

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**ELECCIÓN DEL MATERIAL DE APOORTE PARA LA APLICACIÓN DE
RECUBRIMIENTO DEL ACERO ASTM A516-GRADO 70 POR EL PROCESO SMAW
(Investigación Tecnológica)**

PRESENTADO POR:

BR. HENRY ORLANDO MERMA LEÓN

**PARA OPTAR AL TÍTULO
PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALÚRGICO.**

ASESOR:

DR. MILNER SEGOVIA SEGOVIA

CUSCO - PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: ELECCIÓN DEL MATERIAL DE DORTE PARA LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO DEL ACERO ASTM A516 - GRADO 70 POR EL PROCESO SHAW (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

Presentado por: HENRY ORLANDO NERIO LEON DNI N° 70764534

presentado por: DNI N°:

Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 5 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 10 de JULIO de 2025



Firma

Post firma Milner Segovia Segovia

Nro. de DNI 23815063

ORCID del Asesor 0000-0002-2281-748X

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:473209414

HENRY ORLANDO MERMA LEON

APA Henry Orlando Merma León levantamiento de observaciones turnitin.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:473209414

Fecha de entrega

11 jul 2025, 12:36 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

11 jul 2025, 1:02 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

APA Henry Orlando Merma León levantamiento de observaciones turnitin.docx

Tamaño de archivo

3.7 MB

155 Páginas

28.366 Palabras

152.485 Caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 25 palabras)

Exclusiones

- N.º de fuentes excluidas
- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica,

Señores Docentes, miembros del Jurado:

En cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos vigente en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el propósito de optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico, presentamos a su consideración la tesis titulada:

"ELECCIÓN DEL MATERIAL DE APOORTE PARA LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DEL ACERO ASTM A516-GRADO 70 POR EL PROCESO SMAW".
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA).

Confío en que este trabajo de investigación contribuya al desarrollo del conocimiento en el campo de la soldadura y sea de utilidad para los profesionales y técnicos involucrados en esta área.

Br. Henry Orlando Merma León

DEDICATORIA

Han sido años complicados, llenos de esfuerzos y sacrificios para cerrar esta etapa, solo me queda dedicar este trabajo principalmente a Dios por haberme dado la salud y fortaleza de permitir llegar a esta instancia del camino, donde me vuelvo un profesional.

A mis padres Raimundo Merma Contreras, Julia Angélica León Alzamora, mis hermanos Rosmery, Alfredo y Vanessa por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, su aliento, por la motivación constante que me ha permitido llegar ser una persona de bien, por su paciencia, cuidados, por los regaños que bien merecía, pero más que nada por el amor y la ayuda que me brindaron para que todo esto funcionara; culminar esta etapa no fue fácil, pero estuvieron ahí motivándome, mil gracias familia.

In memoriam

En honor a mi padre Raimundo Merma Contreras, quien fue siempre una inspiración de sacrificio y trabajo para mí y mis hermanos, padre mío aunque ya no estés físicamente con nosotros, tu espíritu y amor está siempre guiándome en cada paso que doy.

Que la fragua, el yunque y el martillo sigan en mi camino.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica por la dedicación y enseñanza que me brindaron durante mi formación profesional. A mis queridos padres, hermanos y demás familiares a quienes les debo todo mi agradecimiento por brindarme su apoyo y sabiduría en todo momento y fueran muy determinantes para mi formación personal y desarrollo como un integrante productivo para la sociedad.

De manera especial;

A mí padre Raimundo Merma Contreras quien fuera el primer maestro herrero de la ciudad de Abancay, quien siempre me enseñó la metalurgia del acero y me motivó a la realización de la tesis.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE	v
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCION	xv
CAPITULO I	1
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACION.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Formulación del Problema Objeto de Investigación.....	2
1.2.1 Problema General.....	2
1.2.2 Problemas Específicos	2
1.3 Justificación e Importancia.....	2
1.3.1 Justificación Económica	2
1.3.2 Justificación Ambiental	2
1.3.3 Justificación Social	3
1.3.4 Justificación Tecnológica.....	3
1.3.5 Importancia	3
1.4 Objetivo General y Específicos.....	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Hipótesis General y Específicos.....	4
1.5.1 Hipótesis General.....	4
1.5.2 Hipótesis Especificas	5
1.6 Variables Dependientes e Independiente	5
1.6.1 Variable Dependiente.....	5
1.6.2 Variable Independiente	5
1.7 Población y Muestra.....	5
CAPITULO II	6

MARCO TEORICO.....	6
2.1 Antecedentes Nacionales e Internacionales	6
2.1.1 Antecedentes Nacionales	6
2.1.2 Antecedentes Internacionales.....	6
2.2 Procesos Anticorrosivos y Recubrimientos Duros.....	8
2.2.1 Procesos de Recubrimientos Metálicos	8
2.2.1.1 Procesos en estado de solución	8
2.2.1.2 Procesos en estado gaseoso	16
2.2.1.3 Procesos en estado fundido y semifundido	23
2.3 Selección de Consumible	25
2.3.1 Proceso de Aplicación del Depósito de Soldadura	28
2.3.1.1 Overlay	28
2.4 Recipientes Sujetos a Presión.....	30
2.4.1 Aceros para Fabricación de Recipientes Sujetos a Presión.	30
2.4.2 Acero ASTM A516 Grado 70.....	31
2.4.2.1 Fabricación del acero ASTM 516 grado 70	32
2.4.2.2 Tratamiento Térmico.....	33
2.4.2.3 Aplicaciones del acero A516 grado 70	33
2.5 Posiciones de Soldadura.....	33
2.6 Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (Smaw)	37
2.6.1 Definición	37
2.6.2 Ventajas y limitaciones del Soldeo por Arco con Electrodo Revestidos	38
2.6.3 Principios del Proceso.....	39
2.6.4 Transferencia Metálica.....	42
2.6.5 Fuentes de Poder	42
2.6.6 Variables del Proceso.....	43
2.6.7 Efecto de las Variables en el Proceso SMAW	45
2.6.8 Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco	50
2.6.9 Cálculo del Ancho de la ZAC	51
2.7 Carbono Equivalente	52
2.7.1 Formulas del Carbono Equivalente (CE).....	53
2.8 Temperatura de Pre calentamiento (método de Seferian)	55

2.9	Electrodos Revestidos	56
2.9.1	Características de los Electrodos	58
2.9.2	Interpretación de las Normas para Electrodos	59
2.9.3	Tipo de Corriente y Revestimiento Según Norma	60
2.10	Dilución	62
2.10.1	Variables de Soldadura que Afectan la Dilución	63
2.11	Composición Química del Cordón de Soldadura	66
2.12	Ensayos no destructivos	67
2.12.1	Inspección Visual (VT - Visual Testing)	67
2.12.1.1	Ventajas y limitaciones del método de VT	68
2.12.1.2	Criterios de aceptación	68
2.12.2	Líquidos Penetrantes (PT - Penetrant Testing)	69
2.12.3	Partículas Magnéticas (MT - Magnetic Testing)	69
2.12.4	Ultrasonido (UT - Ultrasonic Testing)	69
2.12.5	Corrientes Inducidas (ET - Eddy Current Testing)	69
2.12.6	Radiografía (RT - Radiographic Testing)	69
2.13	Ensayos Destructivos	70
2.13.1	Ensayo de dureza	70
2.13.2	Ensayo de Dobleza	72
2.14	Calificación del Procedimiento	74
2.14.1	Especificación del Procedimiento de Soldadura o WPS (Welding Procedure Specification)	74
2.14.2	Registro de la Calificación del Procedimiento o PQR (Procedure Qualification Record)	75
2.14.3	El Registro de la Calificación de la Habilidad del Soldador o WPQR (Welder Performance Qualification Record)	75
CAPITULO III		76
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL		76
3.1	Maquinaria, Equipos, Herramientas	76
3.1.1	Máquina de Soldar	76
3.1.2	Durómetro Equotip 2	77
3.1.3	Equipo de Dobleza en “U”	78
3.2	Material de Prueba y Material de Aporte	78

3.2.1	Material de Prueba	78
3.2.2	Material de Aporte	79
3.3	Características de las Probetas	85
3.4	Cálculo de Carbono Equivalente.....	86
3.5	Cálculo de la temperatura de precalentamiento (método de Seferian).....	87
3.6	Recomendaciones Para Realizar la Soldabilidad de las Probetas	87
3.7	Soldabilidad de las Probetas.....	88
3.7.1	Cálculo de Calor Neto Aportado.....	88
3.7.2	Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC)	89
3.7.3	Determinación de la Dilución	91
3.7.4	Cálculo de la composición química del electrodo seleccionado.....	92
3.8	Control de Calidad de las Probetas	93
3.8.1	Inspección Visual de las Probetas Soldadas	93
3.8.2	Prueba de Dobleza	94
3.8.2.1	Criterios de aceptación para ensayos de doblez.	95
3.8.3	Ensayo de Dureza (HB)	96
3.9	Resultados obtenidos y su discusión	97
3.9.1	Incremento de la Intensidad de Corriente	97
3.9.2	Inspección Visual de las Probetas Soldadas	98
3.9.3	Prueba de Doblado.....	99
3.9.4	Ensayo de Dureza	101
CONCLUSIONES		105
RECOMENDACIONES.....		107
REFERENCIAS.....		108
ANEXOS		110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de electrodeposición de níquel	11
Tabla 2 Aceros al carbono utilizados para la fabricación de recipientes sujetos a presión	31
Tabla 3 Composición Química y propiedades de aceros para fabricación de recipientes a presión.....	31
Tabla 4 Grados del acero versus resistencia a la tracción.....	32
Tabla 5 Dureza del acero ASTM A516 Grado 70.....	32
Tabla 6 Comparación entre corriente continua y corriente alterna.....	48
Tabla 7 Valor de la constante k.	50
Tabla 8 Eficiencia térmica de los procesos de arco.	51
Tabla 9 Función del revestimiento	58
Tabla 10 Tipo de corriente y revestimiento según norma AWS.	61
Tabla 11 Niveles de dilución de los procesos de soldadura	63
Tabla 12 Ventajas y limitaciones del método de VT	68
Tabla 13 Escalas de dureza Rockwell.....	71
Tabla 14 Composición química del depósito	80
Tabla 15 Propiedades mecánicas	80
Tabla 16 Composición química del depósito	81
Tabla 17 Propiedades mecánicas	81
Tabla 18 Composición química del depósito	83
Tabla 19 Propiedades mecánicas	83
Tabla 20 Composición química del depósito	84
Tabla 21 Propiedades mecánicas	84
Tabla 22 Composición química (en %) de electrodos	85
Tabla 23 Dimensiones de las probetas	85
Tabla 24 Cálculo del carbono equivalente	86
Tabla 25 Calor neto aportado en la soldabilidad de las probetas	89
Tabla 26 Ancho de la ZAC	91
Tabla 27 Valores del coeficiente de dilución	91
Tabla 28 Composiciones químicas del material base y del material de aporte	92
Tabla 29 Resumen de la composición química de los depósitos con diferentes electrodos	93
Tabla 30 Resultados de la inspección visual	94
Tabla 31 Resultado de las pruebas de doblado	96
Tabla 32 Dureza del depósito de soldadura, de la ZAC y del material base.....	97
Tabla 33 Incremento de la intensidad de corriente	97
Tabla 34 Resultados de la inspección visual	98
Tabla 35 Resultados de la prueba de doblado	100
Tabla 36 Resultados de la prueba de doblado	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Proceso típico de deposición gaseosa CVD aplicado a herramientas</i>	17
Figura 2 <i>Procesos derivados de la Deposición Química de Vapor (CVD)</i>	18
Figura 3 <i>Zonas presentes en un proceso CVD Térmicamente Activado.</i>	19
Figura 4 <i>Procesos de recubrimientos basados en la Deposición Física de Vapor (PVD)</i>	21
Figura 5 <i>Efectos ocurridos en la superficie durante el bombardeo de iones.</i>	22
Figura 6 <i>Soldaduras de chapas a tope</i>	34
Figura 7 <i>Posiciones de soldadura en chapas en ángulo.</i>	35
Figura 8 <i>Posiciones de soldadura en tubos a tope</i>	36
Figura 9 <i>Soldadura por arco con electrodo revestido</i>	37
Figura 10 <i>Diagrama del proceso SMAW.</i>	41
Figura 11 <i>Gas ionizado como conductor de corriente</i>	42
Figura 12 <i>Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones.</i>	44
Figura 13 <i>Designación del electrodo – Segun AWS</i>	59
Figura 14 <i>Zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución.</i>	62
Figura 15 <i>Tipos de oscilación y su efecto en el cordón de soldadura</i>	65
Figura 16 <i>Efecto de la velocidad de avance sobre la dilución</i>	66
Figura 17 <i>Dispositivo (matriz) para doblez de probetas</i>	73
Figura 18 <i>Soldadura en cara y raíz</i>	73
Figura 19 <i>Fuente de poder</i>	76
Figura 20 <i>Durómetro Equipo 2</i>	77
Figura 21 <i>Equipo para prueba de doblez en U</i>	78
Figura 22 <i>Probetas para experimentación</i>	79
Figura 23 <i>Tipos de electrodos</i>	85
Figura 24 <i>Probetas para la experimentación</i>	86
Figura 25 <i>Soldabilidad de las probetas</i>	88

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ASTM:	American Society for Testing Materials (Sociedad americana para la prueba de materiales)
AWS:	American Welding Society (Sociedad americana de soldadura)
AISI:	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y Acero)
ANSI:	American National Standards Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares)
SMAW:	Shielded Metal Arc Welding (Soldadura de arco eléctrico con electrodo)
TIG:	Tungsten Inert Gas (Soldadura de gas inerte revestido)
MB:	Metal Base
WPS:	Welding Procedure Specification (Especificación del Procedimiento de Soldadura)
ZAC:	Zona Afectada por el Calor (también llamada HAZ)
ZF:	Zona Fundida
MPa:	Megapascal
H=	Energía de soldeo, en J/mm
V =	Voltio
A =	Amperio
v =	Velocidad de soldeo.
Tmax =	Temperatura máxima
To =	Temperatura inicial de la chapa.
Tm =	Temperatura de fusión o temperatura del liquidus del metal a soldar.
C =	Calor específico del metal sólido.
Hnet =	Energía neta aportada.

t=	Espesor de la chapa a soldar.
ρ =	Densidad del material
ρC =	Calor específico volumétrico.
Y=	Ancho de la zona afectada térmicamente.
R =	Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura
k=	Conductividad térmica del metal
V:	Velocidad de soldeo.
XW:	Porcentaje promedio del elemento X en el depósito de soldadura
XA:	Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A
XB:	Porcentaje promedio del elemento X en el metal base B
DA:	Porcentaje de dilución del metal base A, expresado en decimal
DB:	Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal
DT:	Porcentaje de dilución total, expresado en decimal
HRC:	Dureza Rockwell C
WPS:	Welding Procedure Specification (Especificación del Procedimiento de Soldadura)
PQR:	Procedure Qualification Record (Registro de la Calificación del Procedimiento)
WPQR:	Welder Performance Qualification Record (Registro de la Calificación de la Habilidad del Soldador)

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo seleccionar el electrodo más adecuado para el recubrimiento, este recubrimiento busca proporcionar una superficie resistente a la corrosión y minimizar el desgaste prematuro en los componentes recubiertos.

Para ello, se evaluaron distintos electrodos de acero inoxidable disponibles en el mercado nacional, aplicándolos sobre probetas de acero A516 GRADO 70, material ampliamente utilizado en la fabricación de estructuras y recipientes a presión. La soldadura se realizó mediante el proceso SMAW, siguiendo un procedimiento específico que incluyó parámetros como la intensidad y tensión de corriente, velocidad de soldadura y coeficiente de dilución.

A partir de los valores experimentales obtenidos, se calcularon el calor neto aportado y el coeficiente de dilución para determinar la composición química del recubrimiento. Los resultados evidenciaron que los electrodos cumplen con el rango de dilución óptimo para el recubrimiento overlay del acero A516 GRADO 70, garantizando propiedades adecuadas en la capa depositada.

Palabras clave: Recubrimiento (overlay), acero ASTM A516-GRADO 70, proceso SMAW, dilución.

ABSTRACT

The purpose of this study is to select the most suitable electrode for coating. This coating aims to provide a corrosion-resistant surface and minimize premature wear on coated components.

To this end, various stainless-steel electrodes available on the domestic market were evaluated, applying them to A516 GRADE 70 steel specimens, a material widely used in the manufacture of structures and pressure vessels. Welding was performed using the SMAW process, following a specific procedure that included parameters such as current intensity and voltage, welding speed, and dilution coefficient.

From the experimental values obtained, the net heat input and the dilution coefficient were calculated to determine the chemical composition of the coating and its similarity to AISI 304 stainless steel. The results showed that the electrodes meet the optimal dilution range (10-20%) for the overlay coating of A516 GRADE 70 steel, ensuring adequate properties in the deposited layer.

Keywords: Overlay, ASTM A516-GRADE 70 steel, SMAW process, dilution.

INTRODUCCION

En la industria metalúrgica, el recargue (overlay) del acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso de soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW) constituye una técnica esencial para restaurar y prolongar la vida útil de componentes sometidos a desgaste, corrosión o daños mecánicos. Su aplicación es crítica en sectores como la industria petrolera, la generación de energía, la construcción naval y la fabricación de maquinaria pesada, donde se requieren soluciones técnicas confiables para proteger materiales expuestos a condiciones severas de operación.

El motivo que dio origen a esta investigación fue la identificación de deficiencias en la calidad de recubrimientos aplicados sobre el acero ASTM A516-GRADO 70 dentro de la industria metalmeccánica y en la fabricación de recipientes a presión, derivadas, en muchos casos, de una selección inadecuada del material de aporte. Esta decisión, que suele realizarse sin un análisis técnico profundo, puede comprometer la adherencia del recubrimiento (recubrimiento anticorrosivo), su resistencia al desgaste, la integridad estructural de la unión soldada y, en consecuencia, la seguridad y vida útil del componente metálico.

Frente a esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo principal establecer criterios técnicos para seleccionar el material de aporte más adecuado en el recargue del acero ASTM A516-GRADO 70 (recubrimiento anticorrosivo), considerando su compatibilidad química y comportamiento mecánico en el proceso SMAW. El aporte a la ciencia y tecnología radica en el desarrollo de una propuesta metodológica basada en fundamentos metalúrgicos, propiedades de los materiales, procesos de soldadura y estándares de calidad, que pueda ser aplicada tanto en el ámbito académico como industrial.

Durante el proceso investigativo se enfrentaron dificultades asociadas a la obtención de materiales comerciales con propiedades consistentes, así como a la reproducción controlada de condiciones similares a las del entorno operativo real. No obstante, estas limitaciones fueron abordadas mediante una metodología experimental rigurosa, análisis de laboratorio y una revisión crítica de la literatura especializada.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACION

1.1 Planteamiento del Problema

El acero ASTM A516-GRADO 70 es ampliamente utilizado en la fabricación de recipientes a presión y estructuras que operan en condiciones de carga moderada y temperaturas controladas. Sin embargo, su resistencia al desgaste y a la corrosión es limitada, lo que reduce su vida útil en aplicaciones exigentes. Para mejorar sus propiedades superficiales, se aplican recubrimientos mediante soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW), lo que permite incrementar la resistencia mecánica y química de la superficie expuesta.

La selección del material de aporte adecuado es un factor crítico en la optimización del rendimiento del recubrimiento, ya que influye en la adherencia, la dureza, la resistencia al desgaste y la integridad estructural del revestimiento depositado. Sin embargo, la falta de criterios técnicos específicos para la elección del material de aporte puede derivar en problemas como fisuración, baja adherencia, pérdida prematura del recubrimiento o incluso fallas estructurales en el acero base.

En este contexto, surge la necesidad de determinar qué material de aporte es el más adecuado para el recubrimiento del acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso SMAW, considerando factores como la compatibilidad metalúrgica, la dureza alcanzada en el depósito de soldadura y la calidad del recubrimiento en términos de defectos y propiedades mecánicas.

1.2 Formulación del Problema Objeto de Investigación

1.2.1 Problema General

¿Qué material de aporte será el más adecuado para el recubrimiento del acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso SMAW?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo influirá la composición química del material de aporte en la calidad del recubrimiento aplicado sobre el acero ASTM A516-GRADO 70?
- ¿Cuál será la variación de dureza del recubrimiento en función del material de aporte seleccionado?
- ¿Cómo afectará la selección del material de aporte a la presencia de defectos en el recubrimiento?

1.3 Justificación e Importancia

1.3.1 Justificación Económica

La aplicación de recubrimientos duros mediante el proceso SMAW permite extender la vida útil de componentes fabricados con acero ASTM A516-GRADO 70, reduciendo la necesidad de reemplazo frecuente y los costos asociados a mantenimiento correctivo. La selección óptima del material de aporte contribuye a minimizar el consumo de insumos, optimizar el uso de recursos y reducir costos operativos en industrias que emplean este tipo de acero, como la fabricación de recipientes a presión y estructuras sometidas a desgaste.

1.3.2 Justificación Ambiental

La optimización del material de aporte en los recubrimientos de soldadura reduce el desperdicio de material y el impacto ambiental asociado a la fabricación y disposición de piezas desgastadas. Además, al prolongar la vida útil de los componentes, se disminuye la generación de residuos metálicos y la demanda de nuevos materiales, lo que contribuye a un uso más sostenible de los recursos naturales y a la reducción de la huella de carbono en los procesos industriales.

1.3.3 Justificación Social

El incremento en la vida útil y seguridad de las estructuras fabricadas con acero ASTM A516-GRADO 70 beneficia a sectores industriales que dependen de equipos confiables, como el energético, el petroquímico y el manufacturero. Asimismo, el desarrollo de criterios técnicos para la selección de materiales de aporte puede servir como referencia para soldadores, ingenieros y técnicos, mejorando la capacitación y fomentando mejores prácticas en el sector metalmecánico.

1.3.4 Justificación Tecnológica

Esta investigación aporta al conocimiento sobre la selección de materiales de aporte en el proceso SMAW, optimizando las propiedades del recubrimiento y su desempeño en condiciones reales de operación. Además, el estudio contribuirá al desarrollo de procedimientos de soldeo más eficientes y con mejores estándares de calidad, lo que permitirá a la industria contar con soluciones tecnológicas más avanzadas y confiables en la protección del acero ASTM A516-GRADO 70.

1.3.5 Importancia

La importancia de los recargues radica en que los componentes de las máquinas industriales están continuamente expuestos al desgaste debido a diversos factores que reducen su vida

útil. Por ello, la aplicación de recubrimientos mediante soldadura es una solución fundamental para prolongar su funcionamiento y optimizar el rendimiento en el sector industrial.

1.4 Objetivo General y Específicos

1.4.1 Objetivo General

Seleccionar el material de aporte más adecuado para el recubrimiento del acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso SMAW, en función de sus propiedades mecánicas y calidad metalúrgica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar el impacto de la composición química del material de aporte en la calidad del recubrimiento aplicado sobre el acero ASTM A516-GRADO 70.
- Evaluar la variación de dureza del recubrimiento en función del material de aporte seleccionado.
- Determinar la relación entre la selección del material de aporte y su incidencia en la formación de discontinuidades del recubrimiento, considerando la presencia de posibles defectos.

1.5 Hipótesis General y Específicos

1.5.1 Hipótesis General

La selección del material de aporte influye significativamente en la calidad del recubrimiento aplicado sobre el acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso SMAW, afectando sus propiedades mecánicas y su integridad estructural.

1.5.2 Hipótesis Específicas

- La composición química del material de aporte tiene un impacto directo en la calidad del recubrimiento, influyendo en su resistencia a la corrosión y adhesión al sustrato de acero ASTM A516-GRADO 70.
- La dureza del recubrimiento varía en función del material de aporte utilizado, debido a diferencias en su composición y su comportamiento metalúrgico durante la solidificación.
- La selección del material de aporte afecta la presencia de discontinuidades en el recubrimiento, tales como porosidad, fisuración y falta de fusión, falta de penetración, etc.

1.6 Variables Dependientes e Independiente

1.6.1 Variable Dependiente

Calidad del recubrimiento

1.6.2 Variable Independiente

Composición química del material de aporte utilizado en el proceso SMAW

Velocidad de soldeo

Intensidad de corriente

Polaridad de corriente

1.7 Población y Muestra

La población en esta investigación está constituida por todos los posibles recubrimientos aplicados mediante el proceso SMAW sobre el acero ASTM A516-GRADO 70, utilizando diferentes materiales de aporte disponibles en el mercado.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes Nacionales e Internacionales

2.1.1 Antecedentes Nacionales

Yhasmani (2018), en su trabajo de investigación realizada en la UNAS- Arequipa en el año 2018, plantea como objetivo la fabricación y montaje de tanques de lixiviación en las instalaciones de la Planta de Beneficio de Ishihuinca, por la Empresa Famico S.A.C. El material utilizado para la fabricación es el acero ASTM A36, el cual es soldado por el proceso FCAW. Dichos tanques son sometidos a un control de calidad mediante ensayos no destructivos, llegándose a la conclusión que los tanques deben tener un minucioso Control de Calidad que permita que los trabajos realizados alcancen un funcionamiento correcto a las exigencias del cliente y el prestigio de la empresa.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

En el trabajo “Análisis fractográfico del recubrimiento metálico overlay depositado mediante proceso SMAW en acero AISI 4130 y evaluado según código ASME sección IX” del autor E. Ayala, O. Pucha (2016), publicado en la facultad de ingeniería mecánica Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, plantea la evaluación del overlay por medio del código ASME sección IX, se obtuvieron siete probetas de las cuales a las cuatro primeras se les ha practicado el ensayo de doblado lateral guiado, mientras que a las tres siguientes se las sometieron al ensayo de tintas penetrantes y un análisis químico del material base, ensayos y análisis químico que los establece el código ASME sección IX en su apartado QW-453, el mismo que indica los procedimientos a seguir para evaluación de recubrimientos metálicos anticorrosivos. Para

determinar qué cambios microestructurales se han producido y como estas microestructuras afectan al comportamiento mecánico, se realizan pruebas adicionales como: Macrografía, Micrografía, Microdureza, Análisis por microscopía electrónica de barrido SEM, y Microanálisis por dispersión de energía (EDX) para tener una visión más amplia de las causas de falla. Se llegó a la conclusión que las probetas ensayadas no aprueban el ensayo de doblado guiado según este código, es decir que el WPS bajo el cual se ejecutó el recubrimiento anticorrosivo Overlay, debe ser rechazado, ya que produce depósitos de calidad deficiente.

De la investigación, “Evaluación de la formación de carburos, en un material ASTM A 516 grado 70, afectado por un proceso de soldadura FCAW y temperaturas superiores a 427 ° C”. del autor Alvarado Moreno, A. (2019). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, realizado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, tiene como objetivo estudiar los efectos de la variación de parámetros de aplicación de un proceso de soldadura Flux Cored Arc Welding (FCAW), en una chapa metálica de acero al bajo carbono ASTM A 516 grado 70, muy comúnmente usado en construcciones para calderas. El estudio se enfocó en la zona afectada por el calor (HAZ), variando la cantidad de voltaje de aplicación del cordón de soldadura de trabajo y el caudal de gas de protección CO₂. Estas muestras se sometieron a una temperatura de 427 °C durante un tiempo de 100 horas continuas con el fin de observar los cambios micro estructurales en la formación de carburos que conlleva a mecanismos de falla como la grafitización y la Esferoidización. Dicho trabajo se concluye que, con la presencia de altas tasas de gas de protección, (14-15 lt/min de CO₂), no se visualiza in relación directa con la formación de carburos y grafitización en la zona del material base y zona HAZ. Sin embargo, según la fotomicrografía, si se conserva formación de carburos y nódulos de grafito, en la zona del material de aporte de la soldadura.

2.2 Procesos Anticorrosivos y Recubrimientos Duros

El deterioro de materiales como el acero, empleado ampliamente en diversas industrias, necesita protección contra entornos agresivos para garantizar su funcionalidad y cumplir con su vida útil esperada. Por esta razón, hoy en día se utilizan distintos métodos de protección superficial que extienden la durabilidad de estos materiales.

En este capítulo se habla de los recubrimientos metálicos que se emplean en sectores como el petrolero, el automotriz o en herramientas y maquinaria. También se explica cómo se aplican estos recubrimientos para que sean resistentes, de buena calidad y cumplan bien su función.

Estos recubrimientos sirven para proteger los materiales contra la corrosión y el desgaste. Actúan como un escudo que separa el material de ambientes corrosivos, o incluso como un sistema de protección catódica, donde el recubrimiento se "sacrifica" para salvar el material base.

Existen diversas técnicas para aplicar recubrimientos metálicos protectores. A continuación, se presentan los métodos más destacados para la aplicación de estos recubrimientos sobre sustratos metálicos.

2.2.1 *Procesos de Recubrimientos Metálicos*

2.2.1.1 Procesos en estado de solución

Las técnicas más comunes en esta categoría incluyen los recubrimientos galvánicos y los aplicados por electrolisis. Por lo general, se usan soluciones acuosas, y los recubrimientos pueden aplicarse tanto en superficies metálicas como no metálicas. Estos métodos se dividen entre procesos químicos y electroquímicos, aunque la línea entre ambos no siempre es clara, ya que

algunas reacciones que parecen puramente químicas podrían, en realidad, tener un componente electroquímico.

a) Niquelado

El proceso de niquelado se utiliza de manera común en áreas decorativas, de ingeniería y electroformación debido a la flexibilidad que ofrece para modificar las propiedades y la apariencia del níquel depositado, lo cual puede ajustarse ampliamente mediante el control de la composición y los parámetros de la solución de deposición.

Aproximadamente el 80% del níquel utilizado en el recubrimiento se destina a aplicaciones decorativas, mientras que el 20% restante se emplea en ingeniería y electroformación. En el ámbito de la ingeniería, el niquelado se utiliza cuando no se requiere un acabado brillante, y los recubrimientos de níquel, que suelen ser libres de azufre, tienen un aspecto mate. Estos recubrimientos pueden especificarse para mejorar la resistencia a la corrosión, el desgaste, para restaurar o reconstruir piezas desgastadas, para modificar las propiedades magnéticas, preparar superficies para esmaltado o recubrimiento orgánico, funcionar como barreras de difusión en dispositivos electrónicos, o para otras aplicaciones. Las industrias que utilizan niquelado para ingeniería incluyen sectores como el químico, nuclear, telecomunicaciones, electrónica de consumo y computación.

La electroformación de níquel, por su parte, se realiza mediante electrodeposición, un proceso que se utiliza en la fabricación de productos de diferentes tipos. A diferencia de la galvanoplastia, en la electroformación el recubrimiento de níquel se adhiere metalúrgicamente al sustrato y se convierte en una parte integral de la superficie. Este proceso implica depositar el níquel sobre un molde no adherente (mandril), de manera que cuando el mandril se retira de la solución de deposición, el níquel se separa del

molde. Las aplicaciones de la electroformación son diversas, incluyendo la fabricación de moldes, matrices y componentes para la industria textil, aeroespacial, de comunicaciones y electrónica.

El Niquelado es similar a otros procesos galvanoplásticos que emplean ánodos metálicos solubles. Para llevarlo a cabo se requiere el paso de corriente directa entre dos electrodos que están inmersos en una solución acuosa conductora de sales de níquel. El flujo de corriente directa causa que uno de los electrodos (el ánodo) se disuelva y el otro electrodo (el cátodo) se recubra con níquel. Los iones de níquel en la solución, cargados positivamente (Ni^{++}). Cuando fluye la corriente, los iones positivos reaccionan con dos electrones ($2e^-$) y se convierten a níquel metálico (Ni^0) en la superficie del cátodo. Sin embargo, en el cátodo no solo ocurre la deposición de níquel, sino también una pequeña fracción de corriente se consume en la liberación de iones de hidrógeno del agua, lo que disminuye la eficiencia de la deposición de níquel, reduciéndola de un 100% a un 92-97%, dependiendo de la composición del electrolito. Esta descarga de hidrógeno produce burbujas de gas en la superficie del cátodo.

En condiciones normales la eficiencia de la disolución en el ánodo es 100% y no hay iones hidroxilo que se descargan desde el agua. En la figura 1, se mencionan los diferentes valores de electrodeposición de níquel. (ASM Handbook, 1994)

Tabla 1*Datos de electrodeposición de níquel*

Espesor del depósito, μm	Peso por unidad de área, g/dm^2	Amperios hora por unidad de área, Ah/dm^2	Tiempo (min) requerido para obtener depósitos de acuerdo a la densidad de corriente (A/dm^2) de:									
			0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10
2	0.18	0.17	20	10	6.8	5.1	3.4	2.6	2	1.7	1.3	1
4	0.36	0.34	41	20	10	6.8	5.1	3.6	2.6	2	1.7	1.3
6	0.53	0.51	61	31	20	15	10	7.7	6.1	5.1	3.8	3.1
8	0.71	0.68	82	41	27	20	13	10	8.2	6.8	5.1	4.1
10	0.89	0.85	100	51	34	26	17	13	10.5	8.5	6.4	5.1
12	1.1	1.1	120	61	41	31	20	15	12	10	7.7	6.1
14	1.2	1.2	140	71	48	36	24	18	14	12	8.9	7.1
16	1.4	1.4	160	82	54	41	27	20	16	14	10	8.2
18	1.6	1.5	180	92	61	46	31	23	18	15	11	9.2
20	1.8	1.7	200	100	68	51	34	26	20	17	13	10
40	3.6	3.4	410	200	140	100	68	51	41	34	26	20

Fuente: Elaboración propia

b) Anodizado

Es un método electroquímico de conversión de aluminio a óxido de aluminio (Al_2O_3) en la superficie del material a recubrir. Para lograr esto la pieza que se desea tratar se conecta como ánodo dentro de una celda electrolítica especialmente diseñada. Aunque varios metales pueden ser anodizados, incluyendo aluminio, titanio y magnesio, es el aluminio quien ha demostrado mayor utilidad y un amplio uso en la industria.

- A continuación, se explican algunas de las razones por las que el anodizado es ampliamente utilizado. Una de las principales es que mejora significativamente la resistencia del aluminio frente a la corrosión. Cuando el recubrimiento de óxido de aluminio se sella correctamente,

actúa como una barrera protectora que impide que agentes externos, como la humedad del aire o el agua salada, lleguen al metal base y lo deterioren. Para asegurar esta protección, es necesario sellar la capa de óxido generada durante el anodizado. Esto puede hacerse a través de distintos métodos, como sumergir la pieza en agua caliente ligeramente ácida, en agua desmineralizada en ebullición, o en soluciones específicas como dicromato caliente o acetato de níquel.

- **Aumenta la resistencia a la abrasión:** El anodizado duro permite formar capas de óxido de aluminio con espesores que van desde 25 hasta más de 100 micras (4 milésimas de pulgada) de espesor dependiendo del proceso utilizado. Gracias a estos recubrimientos, con la dureza inherente de óxido de aluminio, estos recubrimientos son ideales para proteger superficies que están sometidas a fricción constante, como ocurre con componentes que giran o están en movimiento continuo, donde se requiere resistencia a la abrasión. Si bien todas las capas generadas mediante anodizado son más resistentes que el aluminio base, no todas ofrecen la misma durabilidad: las que se obtienen usando ácido crómico o ciertos baños de ácido sulfúrico tienden a ser más delgadas o menos resistentes, lo que limita su eficacia en aplicaciones donde se requiere cumplir los requisitos de resistencia a la abrasión.
- **Mejora la unión adhesiva:** Un anodizado producido en baño de ácido crómico la superficie resultante mejora notablemente la capacidad de adhesión y la durabilidad de los recubrimientos aplicados posteriormente. Gracias a estos revestimientos, este tratamiento se ha convertido en una opción común en la fabricación de fuselajes de aviones modernos, donde es fundamental asegurar uniones firmes y duraderas entre capas de materiales.

c) Cromado

Los recubrimientos de cromado se basan en un tratamiento químico o electroquímico de metales o en soluciones de recubrimientos metálicos que contienen cromo hexavalente y usualmente otro componente. El proceso resulta en la formación de un recubrimiento protector amorfo compuesto del sustrato, compuestos complejos del cromo, y otros componentes del baño de tratamiento. El cromado se aplica principalmente para mejorar la resistencia a la corrosión de materiales desnudos o pintados, para mejorar la adhesión de la pintura u otros acabados orgánicos, y para proporcionar a la superficie metálica un acabado decorativo.

Los baños decorativos de revestimiento de cromo generalmente producen depósitos que se encuentran en el rango de 0.13 a 1.25 μm (5 a 50 μin) de espesor. Para obtener un depósito óptimo y brillante de cromo, el sustrato debe también tener condiciones superficiales uniformes. Si el sustrato no es uniforme, y la superficie es granulosa, opaca o brumosa, entonces debería ser pulida a un acabado de brillo antes de ser revestido con cromo.

Densidades de corrientes excesivamente altas, temperaturas inadecuadas y sustratos pasivos pueden producir depósitos de cromo brumosos y no uniformes. Las condiciones de operación para el revestimiento de cromo deben estar en rangos específicos.

La adhesión de cromo a un sustrato preparado adecuadamente por lo general no es un problema. Sin embargo, si el cromo es colocado sobre una capa que no se aplicó correctamente y de adherencia cuestionable, se formarán ampollas y luego descamaciones, ya sea inmediatamente después del cromado o durante el almacenamiento o servicio.

La clave para la durabilidad a la corrosión ofrecida por el depósito decorativo de cromo, radica en controlar el tipo, tamaño, y distribución de las micro-discontinuidades que se forman en el depósito. Estos pueden ocurrir como poros o grietas. En un medioambiente corrosivo al aire

libre, así como en ensayos de corrosión acelerada, la corrosión se ha observado que procede por acción de la celda galvánica entre el níquel y el cromo, en donde el níquel actúa como ánodo.

El costo del cromado es a menudo influenciado por la complejidad de la pieza de trabajo. Formas simples pueden ser procesadas a través de todas las secuencias de limpieza y revestimiento, con un mínimo de aproximadamente de 33 μm (1300 μin) de cobre y níquel con 0.25 μm (10 μin) de cromo, en aproximadamente 50 min.

Proporcionar estos espesores mínimos en formas complejas requiere periodos largos de recubrimiento, fijación especial, ánodos especiales. Los costos de recubrimiento se incrementan en cada uno de estos factores, aunque los costos de pulido y limpieza se mantengan. Los costos por los equipos y otros gastos generales por pieza de trabajo también se incrementan en relación directa al tiempo de cromado. Además, el costo de materiales se incrementa debido a que mucho metal es cromado innecesariamente sobre proyecciones y otras áreas de alta densidad de corriente

La secuencia de procesos básicos consiste en los siguientes 6 pasos: limpieza, enjuague, recubrimiento de conversión, enjuague después del tratamiento y secado. (ASM Handbook, 1994)

d) Cobreado

Las aleaciones de cobre son ampliamente usadas como recubrimientos electrodepositados, y estos pueden ser usados con prácticamente cualquier sustrato para revestimiento. Mientras aleaciones como cobre-oro y cobre-oro-níquel son comúnmente electro-depositadas, estas son usualmente consideradas como parte de la tecnología de revestimiento en oro. Los revestimientos más frecuentemente usados de aleaciones de cobre son el latón (aleación principal de cobre y zinc) y bronce (principal aleación de cobre y estaño). Latón y bronce están disponibles en una amplia

variedad de composiciones útiles que varían en contenido de prácticamente 100% de Cu a 100% de Zn o Sn.

La capa protectora de latón en chapa de acero y alambre, realiza una función lubricante en las operaciones de embutición profunda y trefilado. El recubrimiento en latón se utiliza para favorecer la adhesión de caucho unido al acero. Por ejemplo los alambres en los neumáticos radiales con cinturón de acero está revestido con una aleación de latón que contiene 63 % y 70% de Cu (para asegurar la mejor adherencia, es importante que los límites de la composición de la aleación se mantengan dentro del 1%). El revestimiento en el trefilado queda de 1.2 mm (0.49in) a aproximadamente 0.15mm (0.006in) de espesor sin interrupciones en el revestimiento. Debido a este recubrimiento no ocurren ampollas entre los alambres unidos al caucho de las llantas.

El recubrimiento en latón se puede hacer en todo equipo de recubrimiento estándar, incluyendo barriles, estanques, y máquinas de hilos y tiras continuas. El acero es el material adecuado para tanques, bobinas y filtros. Sin embargo, se prefieren los tanques de acero inoxidable o titanio revestidos con plásticos o cauchos debido a que el hierro puede formar ferrocianuros que precipitan como ferrocianuros de zinc, lo que resulta en la formación de un lodo color gris. (ASM Handbook, 1994)

El latón puede ser depositado sobre muchas superficies metálicas (como por ejemplo fundiciones de zinc, acero, níquel, y aluminio) después de aplicar procedimientos estándar antes de la deposición. El recubrimiento directo con latón sobre fundiciones de zinc requiere el uso de revestimientos relativamente pesados para prevenir la difusión del latón dentro del zinc dando como resultado pérdida de color; una capa intermedia de revestimiento es a menudo usada para este propósito. Un método de electrodeposición de latón usa esta interacción de difusión para

producir latón por electrodeposición separando capas de cobre y zinc de espesores apropiados y entonces calentar el revestimiento para crear la aleación por difusión.

El espesor del recubrimiento puede ser variado según se requiera, a partir de depósitos flash de capas muy delgadas para fines decorativos hasta los depósitos sobre 0.02 mm (0.001 in) de espesor. (ASM Handbook, 1994)

2.2.1.2 Procesos en estado gaseoso

Los procesos de estado gaseoso son de considerable interés, una de las funciones importantes de estos métodos es que se pueden realizar deposiciones puras de cerámicos sobre sustratos. Los principales beneficios de los procesos, PVD (Physical Vapor Deposition) o CVD (Chemical Vapor Deposition) se listan a continuación:

- a) Mejoran la adhesión al recubrimiento, debido a la capacidad para limpiar y precalentar los sustratos por bombardeo energético con iones a la superficie del sustrato. Este mecanismo es algunas veces llamado sputter cleaning (limpieza por pulverización catódica)
- b) Espesores de recubrimiento más uniformes, a través de efectos de dispersión de gas y la capacidad de girar o desplazar muestras relativas a la fuente de vapor durante la deposición.
- c) Evitan un mecanizado final o pulido después de la etapa del revestimiento, como en la mayoría de los casos, el recubrimiento replica el acabado de la superficie original.
- d) Permiten la deposición de una amplia gama de materiales de revestimiento y del sustrato, incluyendo los aisladores, por lo general por el uso de polarización de radiofrecuencia.

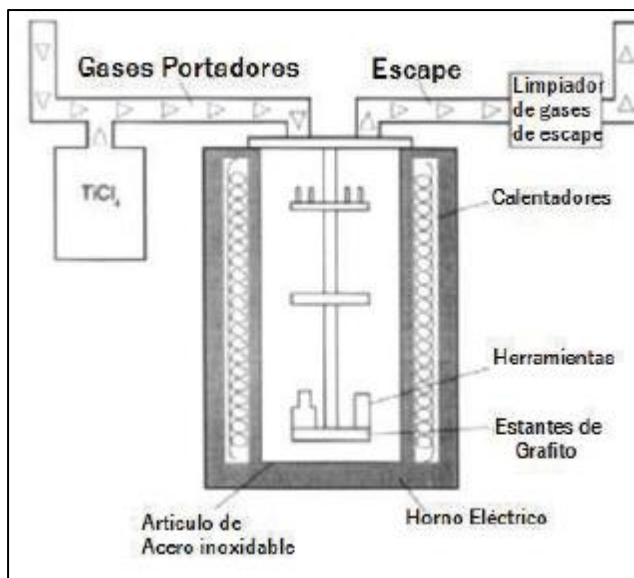
- e) Ayudan a controlar la velocidad de deposición, utilizando una amplia variedad de fuentes de vapor incluyendo: calentamiento por resistencia, haz de electrones, inducción y la pulverización catódica magnetrón.
- f) Por lo general no se producen efluentes o contaminantes, como en la mayoría de los casos no existen subproductos nocivos o soluciones químicas tóxicas utilizadas.
- g) Garantiza depósitos de alta pureza a través de la utilización de un ambiente de vacío controlado y materia prima pura.
- h) Evitan problemas de fragilización por hidrógeno experimentadas en galvanoplastia. (Holmberg & Matthews, 2009)

2.2.1.2.1 Deposición química de vapor (CVD)

En el proceso básico del CVD (ver figura 1) los gases contienen componentes volátiles del elemento o elementos a ser introducidos dentro de la cámara de reacción, esto ayuda a que se condensen sobre el sustrato para formar un recubrimiento. En la figura 2 se muestra el diseño de pared caliente para el proceso CVD, típicamente usado para recubrir herramientas con TiN o TiC. (Holmberg & Matthews, 2009)

Figura 1

Proceso típico de deposición gaseosa CVD aplicado a herramientas



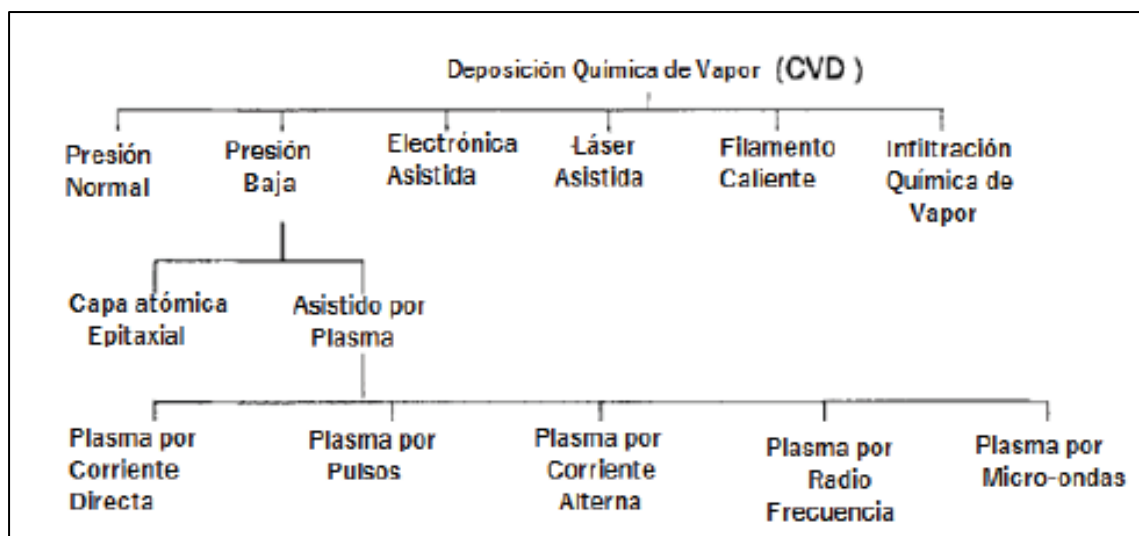
Fuente: Holmberg, K., & Matthews, A. (2009).

En la figura 3, se muestran algunos procesos derivativos del proceso CVD básico. Estos han surgido en respuesta a una necesidad de lograr características de recubrimiento específicos, tales como el crecimiento epitaxial, penetración mejorada en agujeros o bajas temperaturas de deposición. Así también, ciertos tipos de revestimiento (como ejemplo, el diamante) sólo se puede alcanzar mediante procesos tecnológicos particulares. En este sentido el proceso CVD es ahora tan diverso en las variantes disponibles como el proceso VD.

La presión de deposición en el proceso CVD puede variar desde la atmosférica de 1 Pa o menos. También hay diversos medios para ayudar al proceso, el uso de haces de láser o de electrones, o por bombardeo de iones a las películas en crecimiento. (Holmberg & Matthews, 2009)

Figura 2

Procesos derivados de la Deposición Química de Vapor (CVD)



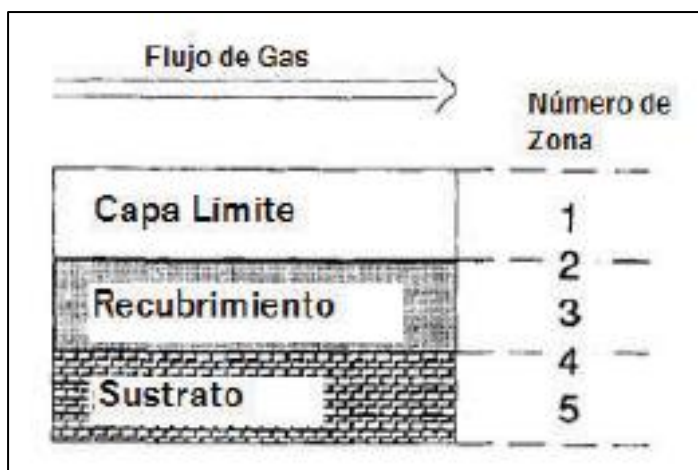
Fuente: Holmberg, K., & Matthews, A. (2009).

La técnica se puede utilizar para depositar un gran número de recubrimientos resistentes al desgaste como: boruros, carburos, nitruros, óxidos, carbo-nitruros y oxinitruros de casi todos los metales de transición. En la figura 3, se describe esquemáticamente las zonas de reacción presentes en un CVD térmicamente activado. Una característica de este modelo es que se identifica una capa límite alrededor de la cual los reactantes y productos de la reacción son transportados. Este controla la velocidad de deposición. Mientras que las reacciones heterogéneas en la zona 2, como se muestran en la figura 3, usualmente define la microestructura del recubrimiento.

Uno de los filmes típicamente depositados por el proceso CVD para aplicaciones tribológicas es el Nitruro de Titanio que tiene un borde de grano de ángulo largo y tamaño de grano en el rango de 0.5 a 5 μm . (Holmberg & Matthews, 2009)

Figura 3

Zonas presentes en un proceso CVD Térmicamente Activado.



Fuente: Holmberg, K., & Matthews, A. (2009).

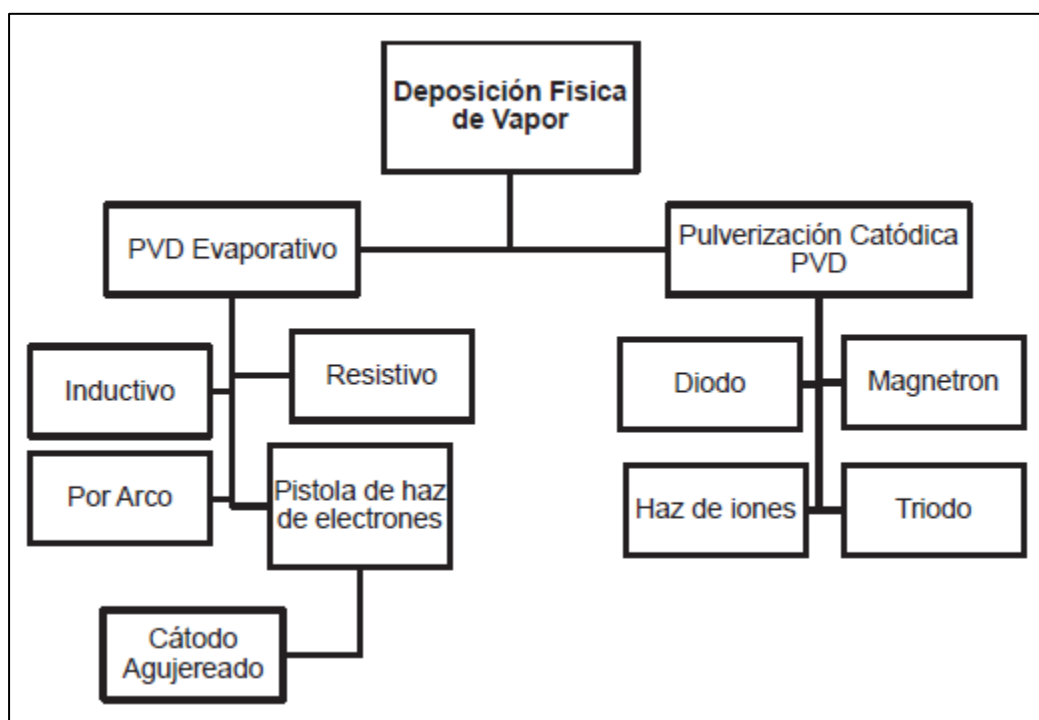
La microestructura depende críticamente de la temperatura de deposición, la cual para TiN es típicamente 950 °C, pero en general para procesos CVD, puede variar desde la temperatura ambiente hasta 2500 °C. A altas temperaturas, varias reacciones en estado sólido, tal como la transformación de fase, precipitación, recristalización y crecimiento de grano pueden ocurrir en las zonas 3 a 5. En la zona 4 de interdifusión, el recubrimiento y el sustrato pueden conducir a la formación de fases intermedias. Tales efectos son críticos para una efectiva adhesión del recubrimiento. (Holmberg & Matthews, 2009)

2.2.1.2.2 Deposición física de vapor (PVD)

El proceso PVD envuelve la atomización o vaporización del material en fase sólida y la deposición de aquel material sobre el sustrato para formar un recubrimiento. Estos incluyen la posibilidad de depositar los compuestos de aleaciones, composiciones y estructuras multicapa, y la capacidad para variar las características de revestimiento de forma continua en toda la película, dando el concepto de un revestimiento funcionalmente calificado. Los desarrollos que conducen a estas mejoras han sido variados y esto ha producido una proliferación de técnicas y acrónimos para distintos procesos, como se ilustra en la figura 4.

Figura 4

Procesos de recubrimientos basados en la Deposición Física de Vapor (PVD)



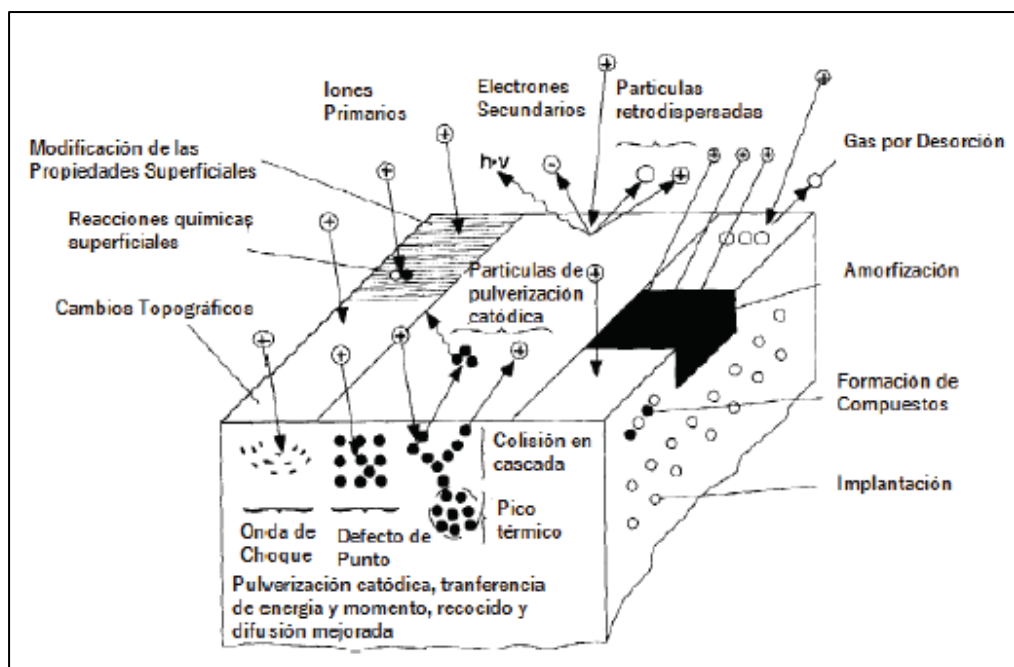
Fuente: Holmberg, K., & Matthews, A. (2009).

E. Ayala, O. Pucha (2016), en su trabajo detalla Considerar primero el proceso básico PVD, el cual es genéricamente llamada “deposición iónica”. Este fue originalmente realizado a bajas presiones, con la probeta a ser recubierta como electrodo negativo en una descarga luminiscente de Argón. Esto condujo al bombardeo o limpieza por pulverización de la superficie con iones de Argón y neutrones acelerados. Luego fue evaporado el metal a ser depositado, dentro de la descarga luminiscente o plasma, siendo este mismo ionizado en un grado para después arribar a la superficie del sustrato con energía incrementada. Este simple concepto todavía se encuentra en el corazón de todos los métodos PVD, aunque cada vez más el nivel de ionización logrado se ve reforzada por algunos medios con el fin de maximizar o controlar los efectos que ocurren. Los principales mecanismos que surgen debido al bombardeo por aceleración de electrones y neutrones son ilustrados en la figura 6. Uno de los más importantes es el mecanismo por pulverización

catódica. Este generalmente considera incluir un proceso de transferencia de momento, en la cual el arribo de átomos causa que otros átomos o grupo de átomos sean eliminados de la superficie. Esto es importante por tres razones. Primeramente, esto permite que la superficie sea despojada de impurezas antes del recubrimiento. En segundo lugar, permite la formación de una capa de Pseudo-difusión entre el sustrato y el recubrimiento, debido al intermezclado forzado del sustrato y átomos del recubrimiento durante la interface de formación. En tercer lugar, el mecanismo de limpieza por pulverización catódica es responsable por la redistribución continua de los átomos del recubrimiento superficial durante el crecimiento de la película, el cual puede conducir a efectos tales como la densificación de la película.

Figura 5|

Efectos ocurridos en la superficie durante el bombardeo de iones.



Fuente: Holmberg, K., & Matthews, A. (2009).

2.2.1.3 Procesos en estado fundido y semifundido

Dentro de esta categoría pueden incluirse los tratamientos superficiales con láser, y las técnicas de hardfacing de spray térmico y soldadura.

2.2.1.3.1 Hot dip (Galvanizado)

Es un proceso en el cual un recubrimiento protector es aplicado al metal por inmersión del mismo en un molde que contiene fundido el recubrimiento. Este recubrimiento puede proteger numerosos metales. Algunas de las virtudes del galvanizado incluyen la habilidad para cubrir áreas de difícil acceso (como esquinas y bordes) con un espesor promedio de recubrimiento mínimo, resistencia al daño mecánico (por que el recubrimiento esta metalúrgicamente unido al acero), y posee buena resistencia a la corrosión en numerosos ambientes. Es así también que el proceso tiene dos factores limitantes. Primero, el recubrimiento debe fundir a temperaturas considerablemente

bajas, y segundo, el metal base de acero no debe contener cambios de propiedades durante el proceso del revestimiento.

El recubrimiento de galvanizado consiste de una serie de capas. Inicia en la superficie del acero, cada capa es una aleación de hierro-zinc con contenido de hierro sucesivamente bajo hasta que se alcanza la capa externa de zinc puro. En el proceso de galvanizado a menudo se agregan de 0.1 a 0.2% de Al, lo cual suprime la formación de capas de aleación de manera que el recubrimiento es mayormente zinc puro. E. Ayala, O. Pucha (2016).

El recubrimiento de zinc cuida al acero de la corrosión por dos métodos. Primero, en varios ambientes el zinc se corroe menos rápido que el acero; por tanto, el recubrimiento de zinc forma una barrera entre el ambiente corrosivo y el acero. Segundo, el zinc protege electroquímicamente al acero. Cuando al acero se le adhiere el zinc, el acero es polarizado a un potencial tal que se transforma en el cátodo del par de acero-zinc y es libre de corrosión. En la práctica, esto significa que el acero expuesto a un defecto de recubrimiento o fisura en un borde, no se corroe hasta que se consume el zinc cercano.

Para que un recubrimiento metálico pueda servir eficientemente como barrera contra la corrosión, este debe corroerse a un ritmo menor que el acero que es el sustrato.

Los recubrimientos de zinc proporcionan al acero una cierta protección contra la oxidación a alta temperatura. No obstante, su utilidad para este propósito se limita a una temperatura máxima de aproximadamente 260 °C (500 °F), debido a la tendencia del zinc a difundirse en los límites de grano del acero y causar la fragilización a altas temperaturas y tiempos de exposición prolongados.

2.2.1.3.2 *Hardfacing*

El hardfacing es el método de deposición metálica, que da resistencia a las superficies, de bajo precio y que sirve para componentes metálicos, con el fin de prolongar la vida útil de servicio. Aunque principalmente se usa para restaurar piezas desgastadas que estuvieron en condiciones de uso, así también se utiliza para componentes nuevos, antes de ponerse en servicio.

A más de extender la vida útil de los componentes nuevos y usados, el hardfacing brinda los siguientes beneficios:

- Menos piezas de recambio necesarias
- La eficacia operativa se incrementa al reducir el tiempo de inactividad.
- Se reduce el costo de metal base.
- Se reducen los costos generales.

Para reconstruir las partes desgastadas con frecuencia se involucran tres pasos:

- Buttering.- Colocar un depósito que va a diluir el contenido de carbono y aleación del metal base.
- Build-up.- En este paso las áreas seriamente desgastadas serán reconstruidas cerca del tamaño de trabajo. Los materiales depositados por soldadura son resistentes al agrietamiento y pueden depositarse en un número ilimitado de capas.
- Hardfacing.- las superficies resistentes al desgaste depositadas sobre el metal base o sobre los depósitos de reconstrucción extienden la vida de servicio. El hardfacing es usualmente limitado a una, dos o tres capas.

2.3 Selección de Consumible

La meticulosa elección de materiales y consumibles para soldadura puede disminuir las diferencias en la macro y micro composición de todo el elemento soldado y así mitigar los efectos galvánicos. Al momento de seleccionar el consumible hay que tener en cuenta factores como: el tipo de material base (sustrato) con el que se cuenta, tipo de desgaste, proceso de soldadura, posición en la que debe efectuarse la soldadura, además de las especificaciones o condiciones de servicio requeridas para llevar a cabo el proceso de soldadura. (Gualco, 2011)

a) Metal base

Hay que detectar el tipo de material que se encuentra desgastado para su posterior reconstrucción.

El acero al manganeso es usado para componentes sujetos a cargas de alto impacto. Para recuperar su tamaño original se utilizan electrodos de composición química muy similar al acero a reconstruir.

Los componentes al carbono y aleaciones de acero son reconstruidos a su tamaño usando depósitos de soldadura de baja aleación.

b) Tipo de desgaste

La principal consideración en la selección de una capa final de hardfacing es el tipo de desgaste a ser encontrado en servicio. Estos pueden ser:

- **Fricción Metal-Metal.** - Es el desgaste de piezas de acero que se encuentran en rodadura o deslizamiento uno contra el otro con poca o ninguna lubricación.

- **Impacto Duro.** - El desgaste por golpeteo severo tiende a aplastar y agrietar la superficie. Los depósitos de acero al manganeso, los cuales trabajan en condiciones de servicio duras, proveen la resistencia más alta al impacto.
- **Abrasión más Impacto.** - El desgaste de material granuloso acompañado por el golpeteo severo tiende a socavar, agrietar, así como triturar la superficie.
- **Abrasión Severa.** - Es el desgaste de material granuloso el cual tritura o erosiona las superficies. La abrasión severa es a menudo acompañada por altas compresiones o impactos moderados. Los depósitos duros son requeridos para resistir la abrasión, pero también necesitarían de sustancias resistentes al impacto.
- **Corrosión.** - Ataque químico o electroquímico.

c) Método de Soldadura por Arco

Este método depende principalmente del tamaño y número de componentes, posición del equipo y frecuencia de hardfacing. Existen los siguientes métodos:

- **Soldadura Manual,** utiliza electrodos revestidos y requiere la menor cantidad de equipo y provee la máxima flexibilidad para las soldaduras en ubicaciones difíciles y todas las posiciones.
- **Soldadura Semiautomática,** utiliza alimentadores de alambre con atmosfera protectora y electrodos tubulares los cuales incrementan la deposición con respecto a la soldadura manual.
- **Soldadura Automática,** requiere en gran medida de la instalación inicial, pero esta provee de la más alta deposición lo que maximiza la productividad. (Gualco, 2011)

2.3.1 Proceso de Aplicación del Depósito de Soldadura

- a) Limpieza.** - Eliminar el óxido, suciedad, grasa, aceite y otros contaminantes de las superficies a soldar.
- b) Preparación de la superficie.** - Las superficies de trabajo endurecidas, agrietadas, o deformadas deben ser eliminados mediante fresado, rectificado.
- c) Espesor del Depósito.** - Evite la acumulación excesiva de depósitos de hardfacing que pueden agrietarse y romperse en servicio.
- d) Temperatura de Pre calentamiento y entre pasadas-** La combinación del contenido de la aleación, el contenido de carbono, el tamaño y la rigidez del material crean la necesidad de precalentar la pieza antes de aplicar una capa de recubrimiento. También puede ser necesario el enfriamiento lento. En aceros al manganeso se requiere bajo o mínimo precalentamiento, baja entrada de calor, y baja temperatura entre pasadas. (Gualco, 2011)

2.3.1.1 Overlay

La soldadura “overlay” es un proceso de soldadura que se aplica a uno o más metales con características específicas para dar propiedades deseables o para restaurar y llegar a las dimensiones originales de los componentes. El Overlay también puede llamarse “cladding” (revestimiento), “weld cladding” (soldadura de revestimiento) o “Weld Overlay Cladding” (Overlay de revestimiento).

El concepto Overlay ó weld cladding denota la (superposición) aplicación de un espesor de capa de 3mm ó 1/8 in de metal soldado con el objetivo de ofrecer una superficie que resista la corrosión. Los materiales que puedes recibir este tratamiento (overlay) son aquellos que tienen como material base aceros al carbono de baja aleación, entre los elementos de este tipo de aceros

tenemos: tuberías, accesorios, válvulas y otros componentes comúnmente usados en la industria del petróleo, recipientes a presión, digestores de papel, reactores de urea, recipientes de contención de reactores nucleares. El material para el revestimiento comúnmente usado es el acero inoxidable austenítico o una aleación con base de níquel, aunque a veces se usa aleaciones con base de cobre. Algunos revestimientos especializados incluyen consigo plata como material de relleno. La técnica del overlay es un excelente método para impartir propiedades a la superficie de un sustrato que no están disponible normalmente, o para materiales de precios elevados o que son difíciles de obtener, por el solo uso de una delgada capa superficial sobre el material. Esta técnica tiene muchas limitaciones inherentes o posibles problemas que deberían ser considerados cuando se planea aplicar un “Overlay”.

La posición de soldadura también debe ser considerada cuando se selecciona un proceso y un material para overlay. Ciertamente los procesos son limitados de acuerdo a la posición de soldadura; por ejemplo, el proceso SAW solo puede usarse en la posición plana. Adicionalmente cuando se usa un proceso de alta velocidad de deposición que presenta un largo charco de líquido, la soldadura vertical o sobrecabeza es difícil o imposible.

Problemas debido a la dilución del acero inoxidable o metales de relleno con base de níquel puede ser minimizado por un primer depósito de capa amortiguadora de níquel de bajo carbono antes de la aplicación de una aleación de revestimiento. La dilución de la fundición en base de hierro dentro del depósito de soldadura puede también mantenerse a un mínimo, teniendo en cuenta:

- La cantidad máxima de metal depositado por unidad de longitud. Las esferas fundidas depositadas deberán traslaparse tanto como sea posible.

- Minimizar la cantidad de calor de entrada con el fin de reducir la cantidad de metal base fundido. El uso de corriente continua de polaridad lineal ayuda a decrecer la penetración.

Se debe tener precaución al considerar la reducción por penetración o fusión del sustrato de hierro fundido. El metal depositado por soldadura debería derretir parte del metal para adherirse correctamente. Una regla importante es que un mínimo de 5 a 10% de dilución se necesita para completar la fusión. (Gualco, 2011)

2.4 Recipientes Sujetos a Presión

Es un contenedor sometido a esfuerzos debido a los efectos de la presión, por procesar, tratar, almacenar o transformar una sustancia. Donde la presión es cualquier valor diferente a la presión atmosférica, proveniente de fuentes externas o como consecuencia de la reacción física y/o química que se lleve en su interior.

2.4.1 Aceros para Fabricación de Recipientes Sujetos a Presión.

Regularmente los recipientes sujetos a presión de acero al carbono se fabrican con aleaciones comerciales, cuya designación específica dependerá de las propiedades físicas y químicas de la sustancia del fluido que se pretende manejar y de las condiciones de operación del recipiente, tales como, presión y temperatura. En la figura 7 se presentan algunos de los principales aceros al carbono utilizados para la fabricación de recipientes sujetos a presión y sus principales aplicaciones en los procesos industriales.

Tabla 2

Aceros al carbono utilizados para la fabricación de recipientes sujetos a presión

Especificación ASME/ASTM	Uso regular
A-285-C	Recipientes estacionarios de baja e intermedia resistencia.
A-455	Recipientes estacionarios de alta resistencia.
A-515-60	Recipientes de media resistencia para servicio de media y alta temperatura.
A-515-70	Recipientes para media y alta temperatura.
A-516-60	Recipientes de media resistencia para servicio de media y baja temperatura.
A-516-70	Recipientes para media y baja temperatura.

Fuente: ASM Handbook (1994)

En la tabla 3 se presentan la composición química nominal de algunos de los principales aceros al carbono utilizados para la fabricación de recipientes sujetos a presión. En dicha tabla se muestran también sus propiedades mecánicas y sus parámetros principales de ductilidad.

Tabla 3

Composición química y propiedades de aceros para fabricación de recipientes a presión.

Especificación ASME/ASTM	Composición química % en peso (Máximo)						σ_y Min. (Ksi)	UTS (Ksi)	% Elong. 2"
	C	Mn	P	S	Si	Cu			
A 36	0.25	--	0.04	0.05	0.40 Máx	0.2	36	58 - 80	23
A-285-C	0.28	0.9	0.035	0.035	0.4	0.02	30	55 - 75	27
A-455	0.33	0.85 - 1.20	0.035	0.035	0.4	0.02	33	70 - 90	22
A-515-60	0.27	0.9	0.035	0.035	0.15 - 0.40	0.02	33	70 - 90	23
A-515-70	0.31	1.2	0.035	0.035	0.15 - 0.40	0.02	38	70 - 90	21
A-516-60	0.27	0.9	0.035	0.035	0.4	0.02	33	70 - 90	23
A-516-70	0.31	1.2	0.035	0.035	0.4	0.02	38	70 - 90	21

Fuente: ASM Handbook (1994)

2.4.2 Acero ASTM A516 Grado 70

Es un acero al carbono - manganeso, considerado como el material más popular para la fabricación de recipientes a presión, debido a su capacidad para resistir elevadas presiones a

diferentes temperaturas, presenta buenos niveles de soldabilidad y resiliencia. Este material también se ofrece en estado normalizado cuando requiere una mejor resiliencia.

El acero estructural A516 se produce bajo la especificación ASTM A516 en los grados 55, 60, 65 y 70, cumpliendo los lineamientos de la norma ASTM A20. En la tabla 1, se puede apreciar los diferentes grados.

Tabla 4

Grados del acero versus resistencia a la tracción.

Grado de acero	Resistencia a la tracción (MPa)
55	380 – 515
60	415 – 550
65	450 – 585
70	485 - 620

Fuente: ASTM A516 (2015)

En la tabla 5, se observa la dureza del acero ASTM A516 Grado 70.

Tabla 5

Dureza del acero ASTM A516 Grado 70

Escala	Rango de dureza aproximado
Brinell (HB)	137 – 179 HB
Rockwell B (HRB)	75 – 90 HRB
Rockwell C (HRC)	10 – 15 HRC
Vickers (HV)	140 – 185 HV

Fuente: ASTM A516 (2015)

2.4.2.1 Fabricación del acero ASTM 516 grado 70

El acero debe ser calmado y de grano fino austenítico. El acero calmado es aquel que ha sido desoxidado por completo, mediante la adición de magnesio, silicio o aluminio antes de la colada. Esto permite conseguir piezas perfectas pues no produce gases durante la solidificación impidiendo la formación de sopladuras.

2.4.2.2 Tratamiento Térmico

Las placas de espesor menor o igual a 40 mm (1.50 pulg.) son suministrados normalmente en condiciones de laminado. En estas se pueden realizar tratamientos de alivios de esfuerzos y/o normalizarlas. Las placas que están por encima del espesor de 40 mm (1.50 pulg). deben ser normalizadas.

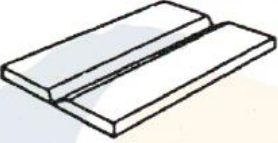
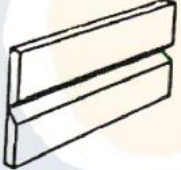
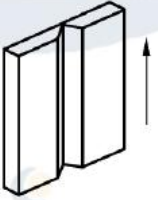
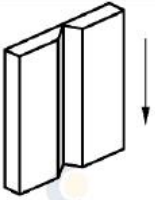
2.4.2.3 Aplicaciones del acero A516 grado 70

Los aceros en calidad ASTM A 516 Gr. 70, se caracterizan por poseer grano fino, tiene buena soldabilidad y alta resistencia al agrietamiento por fragilidad. Se utiliza sobre todo para la fabricación de recipientes para gas (GLP, butano y los tanques de propano), piezas de calderas de vapor, tuberías de presión, compresores, etc., su uso más extendido es en ambientes de aplicación inferiores a -20 °C, además se suministra normalizado. La temperatura de normalización se encuentra entre 900 y 950 °C, el tiempo que se mantendrá el material en el horno después de que la temperatura se estabilice será de aproximadamente 1 minuto por cada mm de espesor de la placa. Por este motivo el material ofrece buenas propiedades de conformación en frío y en caliente, sin afectar negativamente a sus características.

2.5 Posiciones de Soldadura

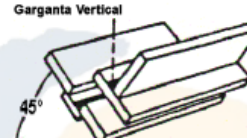
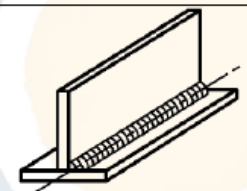
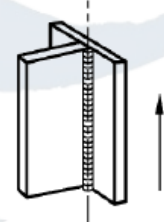
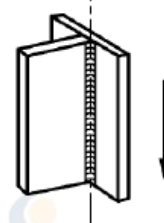
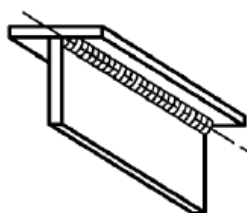
En las figuras 6.7 y 8, se muestra las diferentes posiciones de soldadura según las normas las normas EN ISO 4063 y AWS A3.0.

Figura 6*Soldaduras de chapas a tope*

Soldaduras de chapas a tope			
Norma		Descripción	Croquis
EN ISO 4063	AWS A3.0.		
PA	1G	Chapa horizontal. Soldadura plana.	
PC	2G	Chapa vertical Soldadura en cornisa	
PF	3G ascendente	Chapa vertical Soldadura vertical ascendente	
PG	3G descendente	Chapa vertical Soldadura vertical descendente	
PE	4G	Chapa horizontal Soldadura bajo techo	

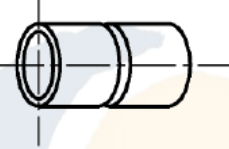
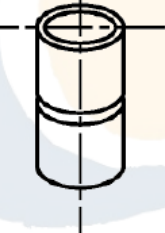
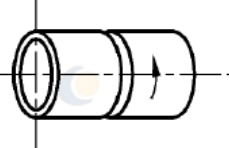
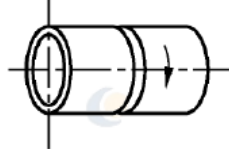
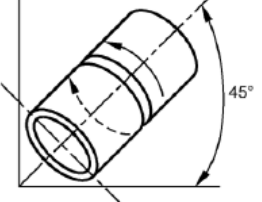
Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

Figura 7*Posiciones de soldadura en chapas en ángulo*

Soldaduras de chapas en ángulo			
Norma		Descripción	Croquis
EN ISO 4063	AWS A3.0.		
PA	1F	Chapa inclinada 45°. Soldadura plana acunada.	
PB	2F	Chapa horizontal Soldadura en rincón	
PF	3F ascendente	Chapa vertical Soldadura vertical ascendente	
PG	3F descendente	Chapa vertical Soldadura vertical descendente	
PD	4F	Chapa horizontal Soldadura bajo techo	

Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

Figura 8*Posiciones de soldadura en tubos a tope*

Soldaduras de tubos a tope			
Norma		Descripción	Croquis
EN ISO 4063	AWS A3.0.		
PA	1G	Tubería horizontal rotando Soldadura plana	
PC	2G	Tubería vertical fija Soldadura en cornisa	
PH	5G ascendente	Tubería horizontal fija Soldadura plana, en vertical y bajo techo	
PJ	5G descendente	Tubería horizontal fija Soldadura plana, en vertical y bajo techo	
H-L045	6G ascendente	Tubería fija a 45° con la horizontal	

Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

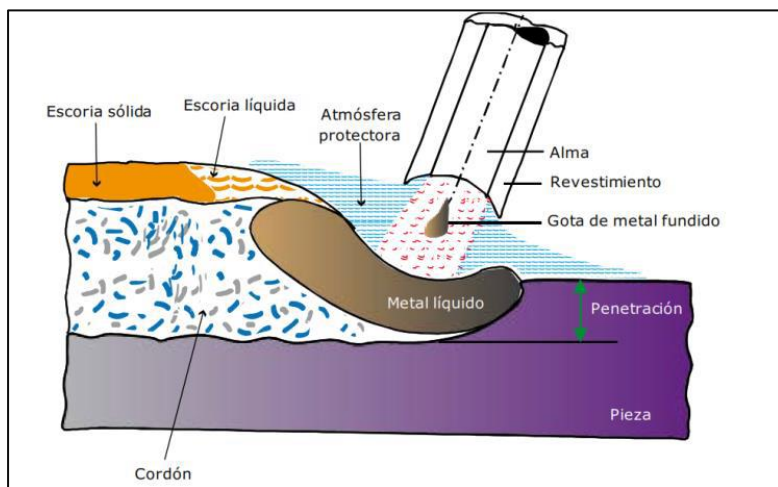
2.6 Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (Smaw)

2.6.1 Definición

Según la AWS este proceso es denominado como SMAW, La soldadura manual es el más extendido entre todos los procedimientos de soldadura. La soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido o simplemente “soldadura eléctrica”, como la conocemos en nuestro medio, es un proceso de unión por fusión de piezas metálicas. Mediante el establecimiento de un circuito eléctrico cerrado al poner en contacto la pinza porta electrodos, conectada a un generador de corriente con el metal base. En la figura 12 se observa la soldadura por arco con electrodo revestido y el resto de sus componentes. (Jeffus, 2009)

Figura 9

Soldadura por arco con electrodo revestido



Fuente: Jeffus (2009)

Los primeros electrodos revestidos fueron fabricados en 1912, unos años antes ya se soldaba con electrodos desnudos que no tenían ningún revestimiento, producían soldaduras de baja calidad y no se utilizaban mucho. En esas fechas tenía mejores prestaciones la soldadura

oxiacetilénica que todavía hoy se utiliza, pero en pocos años los electrodos revestidos se fabricaron en serie bajando su precio.

Actualmente no son muy distintos de aquellos: los fabricantes han mejorado mucho la composición del alma y revestimiento, pero básicamente es un objeto heredado del siglo pasado y las técnicas de utilización son semejantes. (American Welding Society, 2012)

2.6.2 Ventajas y limitaciones del Soldeo por Arco con Electrodo Revestidos

En el soldeo manual por arco con electrodos revestidos se pueden soldar no solo acero al carbono sino también, aceros aleados, aceros inoxidables, fundiciones de hierro y algunos metales más como aluminio, cobre, níquel.

Ventajas:

- Sirven tanto para soldadura en espacios abiertos (siempre que no llueva o haga viento fuerte) como para naves cerradas o talleres.
- Los equipos necesarios no son tan caros y se fabrican tan pequeños que son muy cómodos de utilizar, comparados con los otros procesos manuales.
- Con la protección del revestimiento se puede prescindir de gases y otros sistemas auxiliares. El avance en las prestaciones del electrodo permite que se utilice en soldaduras de más alto nivel como el de recipiente y tuberías de alta presión.
- Se puede utilizar con espesores desde 1,5–2mm y es productivo hasta algo más de 30mm.
- Proceso versátil debido a la disponibilidad y variedad de electrodos.
- Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o

botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía. (American Welding Society, 2012)

Limitaciones:

- No es posible soldar metales de alta sensibilidad al oxígeno ya que los gases que desprende el revestimiento son insuficientes para su protección. Algunos de ellos titanio, circonio, tántalo, etc.
 - No es posible soldar metales de bajo punto de fusión (con electrodo) como: plomo, estaño, zinc, etc.
 - Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.
 - Requiere gran habilidad por parte del soldador.
 - No es aplicable a espesores inferiores a 1.5 mm
 - La tasa de deposición es inferior a la obtenida por los procesos que utilizan electrodo continuo, como el soldeo con alambre tubular o soldeo MIG / MAG. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 50 *mm*), cuando se llega a dicha longitud el soldador tiene que retirar la colilla del electrodo no consumida e insertar un nuevo electrodo.
 - Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5 *mm* en el proceso.
- (American Welding Society, 2012)

2.6.3 Principios del Proceso

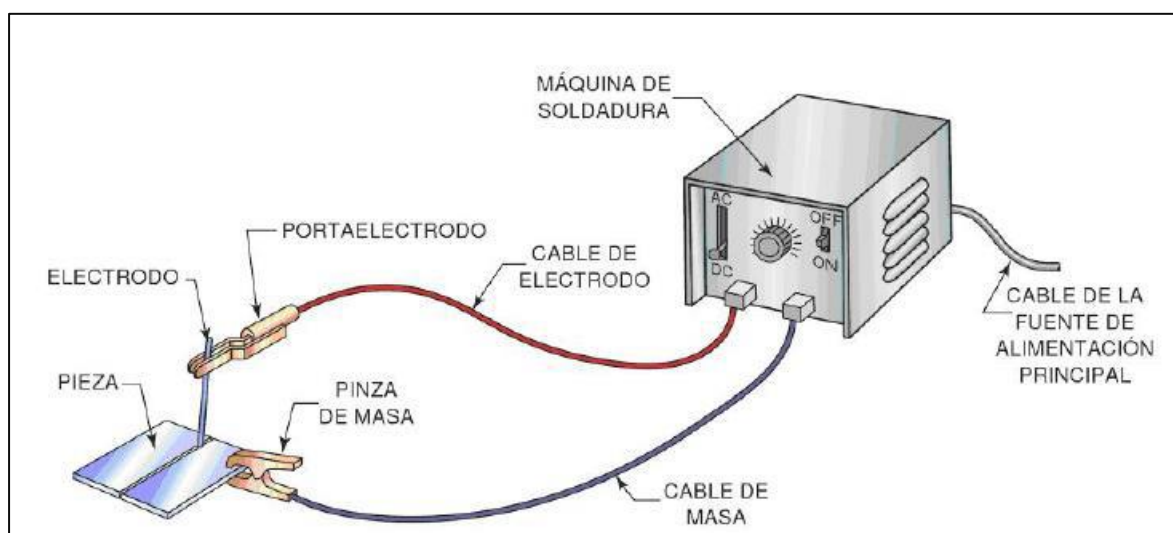
Para lograr la unión, se concentra el calor de un arco eléctrico establecido entre los bordes de las piezas a soldar y una varilla metálica, llamada electrodo, produciéndose una zona de fusión que, al solidificarse, forma la unión permanente.

El circuito se cierra momentáneamente, tocando con la punta del electrodo a la pieza de trabajo, y retirándola inmediatamente a una altura preestablecida, $1,5 - 3\text{mm}$ formándose de esta manera un arco. El calor funde un área restringida del material base y la punta del electrodo, formando pequeños glóbulos metálicos, cubiertos de escoria líquida, los cuales son transferidos al metal base por fuerzas electromagnéticas, con el resultado de la fusión de dos metales y su solidificación a medida que el arco avanza, (Soldexa, 2011, pág. 22), según puede verse en la figura 13. Al establecerse el arco rascando el electrodo (como una cerilla) sobre el metal salta la chispa. La temperatura que se genera ronda los 5000°C , tanto el extremo del electrodo como la zona afectada de la pieza se funde. A medida que el electrodo se va consumiendo el soldador hace avanzar el baño de fusión a lo largo de la unión a soldar.

Mientras tanto el calor se va repartiendo por el metal base, bajando la temperatura por debajo del punto de fusión, por lo que la parte del baño que deja de estar bajo el arco se va solidificando, formando lo que llamamos cordón de soldadura.

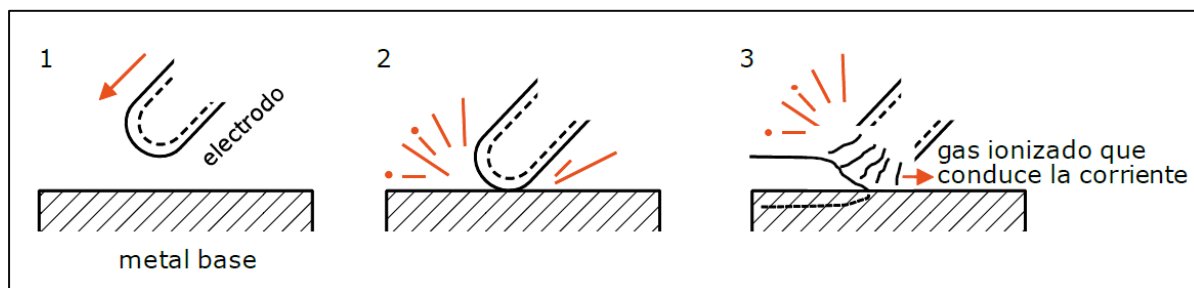
Durante el tiempo de soldeo el electrodo se va fundiendo en forma de pequeñas gotas que se van aportando al baño de fusión consumido éste hasta que no queda de él.

Cuando por un material conductor pasa una corriente eléctrica, se produce en él un calentamiento. Los gases que se desprenden del revestimiento protegen el baño de fusión del contacto con el oxígeno y el nitrógeno del aire. En el interior del revestimiento está el alma o núcleo, una varilla que siempre ha de ser de la misma composición que el metal base y puede variar en longitud y diámetro. (American Welding Society, 2012)

Figura 10*Diagrama del proceso SMAW.*

Fuente: Jeffus (2009)

El arco es la fuente de calor que utilizan muchos de los procesos de soldeo ya que proporciona altas concentraciones de calor y radiación. Podemos decir que es una descarga de corriente normalmente alta que se transmite desde el electrodo a la pieza a través de los gases que produce el revestimiento del electrodo. Esto se logra al raspar el electrodo sobre la pieza, el calentamiento que se produce ioniza el gas, se hace buen conductor. Al separar el electrodo, el gas ionizado permite el paso de la corriente estableciendo el arco. La presencia de materiales fácilmente ionizables como sodio y potasio en el revestimiento facilita esta reacción. El gas ionizado y conductor recibe el nombre de columna de plasma y la corriente la forman electrones constituyendo un flujo que sale del polo negativo del grupo de soldadura (cátodo) hacia el polo positivo del mismo (ánodo). Tal como se observa en la figura 11. (American Welding Society, 2012)

Figura 11*Gas ionizado como conductor de corriente*

Fuente: Marcos (2015).

2.6.4 Transferencia Metálica

Al fundirse el electrodo se forman una serie de gotas de metal fundido junto con el revestimiento de tamaño variable, en función del tipo de electrodo y del tipo de corriente. El tamaño de las gotas es fundamental para definir la calidad de soldadura del electrodo. Las gotas finas producen cordones de soldadura más lisos, cuanto más finas son, más estable es el arco. Esto es especialmente importante para soldadura con corriente alterna. Los electrodos que arden en forma de gotas finas funden más rápidamente, con lo que mejoran los tiempos de soldeo. Por otro lado, las gotas gruesas permanecen colgadas de la punta del electrodo más tiempo, con lo que se retarda su fusión. Esta característica hace aconsejable el uso de este tipo de electrodos para poder soldar aberturas anchas o soldar en posición vertical y en sentido descendente.

2.6.5 Fuentes de Poder

Son máquinas eléctricas, de las cuales se exige además de la suficiente potencia, las características favorables y necesarias para el fácil encendido y mantenimiento del arco eléctrico, características que son indispensables para una buena soldadura.

Estas características son:

- Asegurar una alimentación constante de corriente, que permita mantener el arco estable.
- Transformar el voltaje de la red eléctrica a un voltaje en vacío, que permita iniciar el arco (voltaje en vacío es el que suministra la maquina antes de iniciar el arco: varía de 30 a 90 *voltios*).
- Una vez iniciado el arco, debe permitir una conversión automática e instantánea del voltaje en vacío a un voltaje de trabajo, que permita mantener el arco (voltaje de trabajo es el que proporciona la maquina cuando el arco este encendido; varia de 17 a 45 *voltios*).
- Permitir la regulación de la intensidad de corriente o amperaje necesario para soldar; ese amperaje varía según diámetro, espesor de la pieza, posición del trabajo, diámetro del electrodo, etc.

Además de las características señaladas, una fuente de poder o máquina de soldar debe reunir las condiciones de resistencia y solidez, que le permita trabajar aun estando sometida a las más duras exigencias y según las condiciones en que se desenvuelve la labor del soldador. (Soldexa, 2011, pág. 24)

2.6.6 Variables del Proceso

Las Variables de soldadura son los factores que pueden ser ajustados para controlar una soldadura. Para obtener los mejores resultados en el proceso, es necesario conocer el efecto de cada variable sobre las diversas características o propiedades del proceso de soldadura, tal como se observa en la figura 12.

Figura 12

Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones.

	A	B	C	D	E	F	G
Amperaje	Normal	BAJO	ALTO	Normal	Normal	Normal	Normal
Voltaje	Normal	Normal	Normal	BAJO	ALTO	Normal	Normal
Velocidad	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	BAJA	ALTA
Fusión del electrodo	Buena	Buena	Profunda	Pobre	Se funde poco metal base	Normal	Normal

Fuente: Oerlikon (2008, pág. 71)

Caraballo (2004) Indica que ciertas variables pueden ser continuamente reguladas o fácilmente medidas constituyen controles mejores que aquéllas que no pueden ser medidas o sólo pueden ser modificadas indirectamente, para iniciar el proceso de soldadura, es necesario definir previamente algunas de estas variables, a las que denominaremos:

- **Variables Preseleccionadas:** Entre ellas se encuentran el diámetro del alambre-electrodo, composición química del mismo. Los criterios que permiten una adecuada selección de estas variables son: tipo de material a ser soldado, su espesor, posición de soldadura, régimen de transferencia metálica deseada y propiedades mecánicas necesarias.

- **Variables Primarias:** Son las que controlan el proceso después que las Variables Preseleccionadas, controlan la forma del cordón, la estabilidad del arco, el régimen de soldadura (velocidad de aporte y cantidad de metal adicionado) y la calidad de soldadura. Estas variables son: tensión de arco, corriente de soldadura y la velocidad de avance. (Caraballo, 2014, pág. 2).

2.6.7 Efecto de las Variables en el Proceso SMAW

Para poder realizar correctamente una soldadura hay que considerar varias variables que se deben ajustar antes de su realización.

a) Diámetro del electrodo

En general, se tenderá a seleccionar el mayor diámetro posible en función del espesor del material a soldar, la posición y el tipo de unión, que son los parámetros de los que depende la selección del diámetro del electrodo. Se consigue así un mayor aporte de material.

El aporte térmico depende, directamente de la intensidad, tensión del arco y velocidad de desplazamiento, parámetros dependientes del diámetro del electrodo; siendo mayor cuanto mayor es el diámetro del mismo, en las aplicaciones o materiales donde se requiera que el aporte térmico sea bajo se deberán utilizar electrodos de pequeño diámetro. En general, se deberán emplear:

- Electrodos de poco diámetro (2,2.5,3.25,4 *mm*) en: punteado, uniones de piezas de poco espesor, primeras pasadas, soldaduras en posición cornisa, vertical y bajo techo y cuando se requiera que el aporte térmico sea bajo.
- Electrodos de mayores diámetros para: uniones de piezas de espesores medios y gruesos, soldaduras en posición plana y recargues.

- La utilización de grandes diámetros puede dar lugar a un cordón de soldadura excesivo, innecesario y costoso económicamente, pudiendo también actuar como concentrador de tensiones debido a un perfil inadecuado. (Lincoln Electric, 2013, pág. 15)

b) Intensidad de soldeo

Esta variable es fundamental ya que condiciona el aporte térmico. Por ejemplo, en diámetros pequeños se necesitan intensidades menores y por lo tanto un menor aporte térmico. La intensidad es una variable que depende del tipo de junta y de la posición de soldeo. Una vez iniciado el arco, podemos ajustar la intensidad en función del tipo de baño que se obtenga:

- Si es grande quiere decir que hay un exceso de intensidad. Se deberá reducir.
- Si el baño es pequeño falta intensidad, que deberá aumentarse. (Alonso, 2012, pág. 70)

Cada electrodo, en función de su diámetro, posee un rango de intensidades en el que puede utilizarse, en ningún caso se deben utilizar intensidades por encima de ese rango ya que se producirían mordeduras, proyecciones, intensificación de los efectos del soplo magnético e incluso grietas. (Lincoln Electric, 2013, pág. 15)

c) Longitud de arco

La longitud del arco es la distancia entre la punta del electrodo y el metal que se va a soldar. La longitud del arco a utilizar depende del tipo de electrodo, su diámetro, la posición de soldeo y la intensidad. En general, debe ser igual al diámetro del electrodo, excepto cuando se emplee el electrodo de tipo básico, que deberá ser igual a la mitad de su diámetro.

Es conveniente mantener siempre la misma longitud del arco, con objeto de evitar oscilaciones en la tensión e intensidad de la corriente y con ello una penetración desigual. Un arco demasiado corto puede ser errático y producir cortocircuitos durante la transferencia de metal, un

arco demasiado largo perderá direccionalidad e intensidad, además el gas y el fundente generados por el revestimiento no son tan eficaces para la protección del arco y del metal de soldadura, por lo que se puede producir porosidad y contaminación del metal de soldadura con oxígeno e hidrógeno.

d) Velocidad de soldeo

No existe una regla matemática para regular la velocidad de desplazamiento ya que depende de la habilidad del soldador que debe equilibrar su velocidad de soldadura con el resto de los parámetros. No obstante:

- Cuanto mayor es la velocidad, menor es la anchura del cordón y menor su penetración, menor es el aporte térmico y más rápidamente se enfriará la soldadura, afectando su estructura metalúrgica final y como consecuencia directa a sus propiedades mecánicas finales (carga, rotura, impacto y durezas). (Alonso, 2012, pág. 70)
- Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros). (Lincoln Electric, 2013, pág. 18)
- Con una baja velocidad el cordón será ancho y convexo y poca penetración, debido a que el arco reside demasiado tiempo sobre el metal depositado, (efecto “colchón”), en vez de concentrarse sobre el metal base.

“En la práctica, hay que intentar que el arco vaya ligeramente adelantado al baño, pero depende de la posición de soldadura”. (Alonso, 2012, pág. 70)

e) Corriente de soldadura

Cuando se tiene que realizar la selección del tipo de corriente necesaria, el tipo de electrodos que se va a utilizar es el factor fundamental a la hora de seleccionar tanto el tipo de

corriente como el equipo. El primer determinante que hay que tener en cuenta es la disponibilidad de corriente en el lugar donde se van realizar las tareas de soldadura, todavía la corriente continua (CC6). es el tipo de corriente más utilizada para la soldadura, no obstante, cada vez hay un mayor número de electrodos que utilizan la corriente alterna (CA7). como tipo de corriente de alimentación. En la tabla 3, se da la comparación entre la corriente continua y corriente alterna. (Alonso, 2012, pág. 70)

“Desde el punto de vista de los costes de soldadura, la CA es más barata, pero como este factor tiene cada vez menos importancia en el coste total, no tiene relevancia a la hora de seleccionar el tipo de corriente”. (Alonso, 2012, pág. 70)

Tabla 6

Comparación entre corriente continua y corriente alterna

Parámetro	Corriente Alterna	Corriente Continua
Cebado de arco	No es fácil especialmente en diámetros pequeños, se debe añadir sustancias para facilitar el cebado.	Fácil
Mantenimiento del arco	Debido al cambio de polaridad es más difícil de mantener estable el arco.	Fácil de mantener el arco.
Tipo de electrodo	No se puede utilizar con todos los electrodos. El revestimiento debe contener sustancias que restablezcan el arco.	Válida para todo tipo de electrodos.
Caída de tensión en los cables	La caída de tensión es pequeña por lo que es especialmente adecuada para el punto de soldadura esté alejado de la fuente de alimentación.	Los cables han de ser tan cortos como sea posible por la gran caída de tensión.
Posiciones de soldeo	Especialmente adecuada para todas las posiciones con el electrodo adecuado.	Es de fácil uso en posición para secciones gruesas.
Salpicaduras	Es más abundante.	Escasas
Soplo magnético	Prácticamente inexistente.	El efecto es muy acusado, especialmente cerca de los bordes o de más. Aumenta con la intensidad.

Fuente: Alonso, C. (2012)

De una forma más genérica, las principales ventajas e inconvenientes de cada tipo de corriente son:

- Todos los tipos de electrodos pueden usarse con CC, no así los de CA.
- La soldadura de chapa fina es más difícil con CA.
- El transformador es menos caro que el correspondiente rectificador. Tiene una mayor eficiencia que el convertidor o rectificador y sus pérdidas en circuito abierto son muy pequeñas.
- En C.A. prácticamente es inexistente el efecto del soplo magnético.

“Actualmente existen electrodos en los que, salvo para altas intensidades, este efecto es relativamente pequeño”. (Soldexa, 2011, pág. 23)

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el equipo tiene que ser capaz de suministrar corriente suficiente para el diámetro adecuado del electrodo. Hay que tener en cuenta, como regla práctica, que la intensidad requerida se calcula aplicando la ecuación 1:

$$I = k \times (d - 1) \quad (Ec. 1)$$

I: Intensidad de corriente (Amp)

d: Diámetro de electrodo (mm)

k: Contante que depende del tipo de electrodo

En la tabla 7, se muestra el valor de la constante *k* en función al tipo de electrodo.

Tabla 7*Valor de la constante k.*

Valor de K	Tipo de electrodo
55	Oxidante, básico, rutilo delgado
60	Ácido y rutilo medio
70	Gran rendimiento

Fuente: Alonso, C. (2012)

2.6.8 Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco

Los factores que influyen son:

a) Aporte de calor (heat input).

“El input térmico es la energía aportada por un proceso de soldadura cuando se realiza un cordón por unidad de longitud, es expresado en Joules por milímetro (J/mm). Para procesos de soldadura por arco eléctrico, el input térmico es estimado por la ecuación 2.1.” (Fosca, 2007)

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

H_{net} = Calor suministrado (j/mm)

I = Intensidad de corriente (A)

V = Tensión eléctrica (V)

v = Velocidad de soldeo (mm/seg)

La ecuación 2 permite conocer la energía bruta aportada por la máquina (H). Sin embargo, parte de ésta se pierde antes de llegar a la soldadura, debido a procesos de radiación, convección

y conducción en el arco y en la pieza (A.Garcia, 2010). En ese sentido, es de interés el cálculo de la energía neta aportada (H_{net}), que es el producto del input térmico bruto por el rendimiento del proceso de soldadura, como se muestra en la ecuación 2. (Fosca, 2007)

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \times f \quad (Ec. 3)$$

Donde:

f: Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de los diferentes procesos se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8

Eficiencia térmica de los procesos de arco.

Proceso	Eficiencia
GTAW	20 – 50 %
GMAW	70 – 85 %
SMAW	70-80 %
SAW	90 – 99 %

Fuente: García (2010)

2.6.9 Cálculo del Ancho de la ZAC

Uno de las aplicaciones más interesantes de la ecuación que nos da la temperatura máxima en un punto, es el cálculo de la anchura de la ZAC por la soldadura. Pero, para calcular la anchura con exactitud debe definirse, el extremo de la ZAC más alejado de la soldadura mediante un valor máximo de la temperatura en dicho extremo, este valor de la temperatura tiene, a su vez, que obedecer con algún cambio estructural o de las propiedades del material que se suelda.

A pesar de que la ecuación del máximo de temperatura es de gran uso, es necesario no olvidar las limitaciones existentes sobre su uso. La ecuación se aplica en procesos de pasadas

únicas de penetración completa, soldeo o corte térmico, con independencia del espesor de la chapa. De hecho, también se aplica a cualquier soldadura por arco de penetración completa con menos de 4 pasadas. La ecuación 3 puede aplicarse sobre la base de una por pasada, sin embargo, la temperatura entre pasadas, aquella a la cual la zona de soldadura se enfría entre una y otra pasada, puede considerarse como un valor de T_0 en la ecuación del máximo de temperatura. (Fosca, 2007)

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_0} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_0} \right) \right] \quad (Ec. 4)$$

En cuanto a la polaridad con corriente continua depende del material a soldar y del electrodo empleado, sin embargo, se recuerda que se obtienen mayor penetración con polaridad inversa.

2.7 Carbono Equivalente

Una de las formas de pronosticar la soldabilidad de los aceros es a través de la medida de la dureza del soldeo en la zona afectada por el calor (ZAC). En el soldeo, los valores de dureza altos se han considerado como indicadores, en general de potenciales problemas como la fisuración en frío, comportamiento frágil de las uniones soldadas, oxidación bajo tensión, fragilidad por hidrógeno, etc.

La dureza máxima de un acero depende, principalmente, de su contenido de % C. La dureza máxima real bajo el cordón depende no solo del contenido del acero, sino también de su templabilidad bajo los ciclos térmicos presentes durante la soldadura en la que influyen diversos factores.

Como el carbono es el elemento que más influye en la templabilidad y en la dureza final del acero, se ha considerado convenientemente denominar “carbono equivalente” (CE) al índice

que permite correlacionar la composición química de un acero con su tendencia a presentar estructuras frágiles cuando este es sometido a un proceso de soldadura. (Fosca, 2007)

Existe un gran número de expresiones diferentes para el CE, pero aquí presentaremos algunas de las más empleadas en la actualidad:

2.7.1 Formulas del Carbono Equivalente (CE)

El cálculo del carbono equivalente representa una forma de describir la composición química por medio de un solo número, a fin de analizar como las variaciones de la misma influyen en el comportamiento del material.

El carbono equivalente de un acero es una medida de su tendencia potencial a fisurarse durante o después de la soldadura.

El carbono equivalente brinda información sobre diversos aspectos como pueden ser:

- La templabilidad
- La sensibilidad de los aceros a la figuración en frío (a fin de estimar la temperatura mínima de precalentamiento recomendada o la tolerancia a la figuración debido al hidrógeno).
- La evaluación de las propiedades durante el servicio (que permita medir a través del CE el agrietamiento a causa de los sulfuros o el agrietamiento por corrosión bajo tensiones.)

Existe un gran número de expresiones diferentes para el CE, pero aquí algunos de los más usados en la actualidad:

a) Formula del CE del instituto internacional de soldadura (IIW).

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (Ec. 5)$$

Esta fórmula fue propuesta inicialmente propuesta por DEARDEN y O'Neil en 1940, puede utilizarse para aceros con contenido de carbono superior al 0.18% o en algunas condiciones de soldeo que requieran un enfriamiento lento: $t_{8/5} > 12$ SEGUNDOS. Todos los elementos de aleación están expresados en % en peso. Esta expresión puede utilizarse para aceros con contenido de carbono superior al 0,18% o en unas condiciones de soldeo que requieran un enfriamiento lento: $t_{8/5} > 12$ segundos.

b) Formula del tipo PCM (parámetro de composición).

Fueron propuestas por Ito y Bessyo.

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad 5V \quad (Ec. 6)$$

Esta fórmula es empleada por el código estructural AWS D1.1 para la determinación de la temperatura mínima de precalentamiento.

c) El tipo CEMW

Propuesta por DUREN en el año 1981

$$CEMW = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad (Ec. 7)$$

Ambas pueden elegirse para aceros que tengan una proporción de carbono inferior a 0.22% y en el caso de un enfriamiento rápido: $t_{8/5} < 6$ segundos. Esta ecuación da una mejor correlación con las situaciones reales de soldaduras en campo, donde las velocidades de enfriamiento suelen ser mayores ($t_{8/5} = 2-3$ seg.).

d) Formula del CEN.

Propuesta por Yurioka (1981).

$$CEN = C + A(C) \left[\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right] \quad (Ec. 8)$$

En la que $A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh [20(C - 0.12)]$.

$A(C)$, es un factor de acomodación que se aproxima a 0.5 cuando $\%C < 0.08\%$ y a 1 cuando $\%C > 0.18\%$.

Esta expresión ofrece estimaciones aceptables para aceros con contenidos de carbono hasta el 0.25%.

El criterio que se emplea con el CE es que cuanto más alto sea su valor, el acero tendrá mayor dificultad para ser soldado. Para evitar riesgos de fisuración en frío por la presencia de estructuras frágiles en el cordón de soldadura se recomienda que el CE no sea mayor a 0,35 - 0,40 (dependiendo del espesor de la plancha y el grado de embridamiento de la unión).

Por otro lado, según el código de soldadura estructural ANSI/ AWS D1.1 los aceros también se pueden clasificar de acuerdo a su posicionamiento en el diagrama de Graville.

2.8 Temperatura de Pre calentamiento (método de Seferian)

Seferian propone un método fundamentado en sus estudios en los que usa fórmula para el carbono equivalente (C_t), que lo plantea como suma de un carbono equivalente químico y un térmico.

$$C_t = C_e + C_s \quad Ec. 9$$

$$C_e = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13} \quad Ec. 10$$

$$C_s = 0.005 * e \text{ (mm)} * C_e \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

C_s : carbono equivalente del espesor (%)

e : espesor de la pieza (mm)

C_e : carbono equivalente químico (%)

(C_e), depende de la composición química del acero y de un carbono equivalente del espesor (C_s) o llamado también Seferian.

Finalmente, para obtener la temperatura de precalentamiento (T_p) se aplica la formula desarrollada por Seferian: (Fosca, 2007)

$$T_p = 350 \sqrt{C_s - 0.25} \quad \text{Ec. 12}$$

2.9 Electrodo Revestidos

Los electrodos constan de dos fases fundamentales. Por una parte, está la varilla que constituye el alma del electrodo y por otra, el revestimiento.

El revestimiento es una pasta que se aplica en estado húmedo. Su proceso empieza con la recepción de las materias primas que se muelen, se criban, y se almacenan. Tiene una gran importancia ya que interviene, fundamentalmente, en el proceso de soldadura desde distintos aspectos: (Alonso, 2012, pág. 39)

a) Físicos:

- Preserva el metal fundido de la contaminación de los componentes del aire (oxígeno y nitrógeno, fundamentalmente), ya sea por formación de gases protectores, o por formación de escoria que cubre las gotas y el baño.
- Permite la formación de escoria que, por diferencia de densidades, flota sobre el metal fundido y se solidifica rápidamente formando una “costra” que protege el baño y que, por ser mala conductora térmica, limita el enfriamiento solidificándose por encima del cordón. (Alonso, 2012, pág. 39)

Una soldadura irregular puede producir inclusiones de escoria dentro del cordón dando lugar a defectos de soldadura. Es fundamental, por lo tanto, que el soldador observe la evolución de la escoria para evitar posibles defectos.

b) Metalúrgicos

- Afina el grano del metal fundido de la unión modificando sustancialmente el comportamiento mecánico de la unión.
- Controla la velocidad de enfriamiento del cordón evitando que sea muy rápido.

c) Eléctricos

- Facilita el cebado del arco, ya que favorece el proceso ionizando el aire entre el electrodo y las piezas, mejorando así su conductividad.
- Facilita estabilidad al arco, que depende principalmente del estado de ionización de los gases comprendidos entre el electrodo y la pieza.

En este procedimiento, el soldador sostiene en su mano una pinza que porta el electrodo. Lo sitúa a la distancia adecuada de la pieza para que salte el arco y se deposite la cantidad correcta

del material de aporte, a la vez que va desplazando el electrodo a la velocidad adecuada para conseguir una soldadura homogénea. (Alonso, 2012, pág. 39)

2.9.1 Características de los Electrodos

El revestimiento está compuesto por varios productos orgánicos, metalúrgicos y minerales, tales como ferroaleaciones (manganeso, silicio, titanio), óxidos de manganeso, de titanio, etc. Como aglutinante se suelen emplear silicatos alcalinos solubles. Cada una de las sustancias que se incluyen en el revestimiento tiene una función como se indica en la tabla 4. En función del tipo de los contenidos del revestimiento, los electrodos se clasifican como:

- Ácidos: sus componentes principales son el feldespato, óxido de manganeso y, sobre todo, óxido de hierro.
- Rutilos: prácticamente el componente principal es el óxido de titanio (rutilo), junto con feldespato que se utiliza como formador de escoria y estabilizador del arco.

Tabla 9

Función del revestimiento

Sustancia	Función
Celulosa	Gas protector
Carbonato cálcico	Gas protector
Espato flúor	Formador de escoria
Dolomita	Gas protector
Rutilo TiO_2	Formador de escoria y estabilizador del arco
Titanio Potásico	Estabilizador del arco y formador de escoria
Feldespato	Formador de escoria y estabilizador
Mica	Facilita la extrusión y estabilizador
Arcilla	Facilita la extrusión y formador de escoria
Silice	Formador de escoria
Óxido de manganeso	Formador de escoria y aleante
Óxido de hierro	Formador de escoria y aleante
Polvo de hierro	Mejora la velocidad de deposición
Ferrosilicio	Desoxidante
Ferromanganeso	Aleante desoxidante
Silicato sódico	Aglomerante
Silicato potásico	Estabilizador de arco aglomerante

Fuente: Alonso (2012, pág. 40).

- Básicos: los componentes principales, prácticamente a partes iguales, son el carbonato cálcico (como formador de gas protector), espato de flúor (como formador de escoria) y óxido de titanio (como formador de escoria y estabilizador del arco).
- Celulósico: en este caso, el revestimiento está compuesto, básicamente, de celulosa (como formador de gas protector) y rutilo.

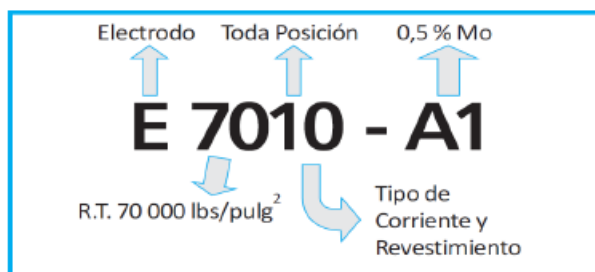
La calidad de la soldadura depende, en gran medida, de los electrodos y éstos dependen de su revestimiento. En algunos tipos de electrodos, más que en otros, el revestimiento es muy sensible a la humedad, que puede provocar poros en la soldadura. Hay que proteger los electrodos de la humedad, especialmente los de tipo básico, almacenándolos en ambiente seco y preservándolos de la lluvia en los trabajos que se ejecutan a la intemperie. (Alonso, 2012, pág. 62)

2.9.2 Interpretación de las Normas para Electrodos

Cada uno de estos electrodos lleva un código impreso en el revestimiento. En la figura 16, se observa la designación según la norma norteamericana AWS.

Figura 13

Designación del electrodo – Según AWS



Fuente: Soldexa (2011, pág. 44).

- a) La letra *E* designa el producto: Electrodo para soldadura eléctrica manual.
- b) Los primeros 2 dígitos en un número de 4 dígitos o 3 dígitos en un número de 5 dígitos señalan la resistencia mínima a la tracción, sin tratamiento térmico post soldadura:
- *E 60XX = 60 000 lbs/pulg mínimo*
 - *E 70XX = 70 000 lbs/pulg*
 - *E 110XX = 110 000 lbs/pulg*
- c) El último dígito, íntimamente relacionado con el penúltimo, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo e identifica a su vez el tipo de revestimiento, el que es calificado según el mayor porcentaje de materia prima contenida en el revestimiento; por ejemplo el electrodo *E-6010* tiene un alto contenido de celulosa en el revestimiento aproximadamente un 30% o más; por ello es que a este electrodo se le clasifica como un electrodo de tipo celulósico. Similar clasificación se da en los otros electrodos.
- d) El tercer dígito indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente con un electrodo.
- (Soldexa, 2011, pág. 45)

2.9.3 Tipo de Corriente y Revestimiento Según Norma

En la tabla 10. Se observa el tipo de corriente y revestimiento según norma AWS.

Tabla 10

Tipo de corriente y revestimiento según norma AWS.

Clasificación AWS	Tipo de recubrimiento	Posición de soldeo según AWS	Corriente eléctrica
E 6010	Alta celulosa, sodio	F,V,OH,H	CC (+)
E 6011	Alta celulosa, potasio		CA o CC(+)
E 6012	Alto titanio, sodio	F,V,OH,H	CA, CC (-)
E 6013	Alto titanio, potasio		CA, CC (+) o CC(-)
E 6020	Alto óxido de hierro	H-Fillete	CA, CC (-)
		F	CA, CC (+) o CC(-)
E 7014	Hierro en polvo, titanio	F,V,OH,H	CA, CC (+) o CC (-)
E 7015	Bajo hidrogeno, sodio		CC(+)
E 7016	Bajo hidrogeno, potasio	F,V,OH,H	CA, CC (+)
E 7018	Bajo hidrogeno, potasio, hierro en polvo		CA, CC (+)
E 7018M	Bajo hidrógeno, hierro en polvo	F, V, OH, H	CC (+)
E 7024	Hierro en polvo, titanio	H-Fillete, F	CA, CC (+) o CC(-)
E 7027	Alto óxido de hierro, hierro en polvo	H-Fillete	CA, CC (-)
		F	CA, CC (+) o CC(-)
E 7028	Bajo hidrogeno, potasio, hierro en polvo	H-Fillete, F	CA, CC (+)
E 7048	Bajo hidrógeno, potasio, hierro en polvo	F, V, OH, H F, V, OH, HV- Descend.	CA, CC (+)

Fuente: Soldexa (2012)

Donde:

F = plana

H = horizontal

H- filete = filete horizontal

V-Descend. (V-down) = vertical descendente

V= vertical

OH= sobre cabeza

2.10 Dilución

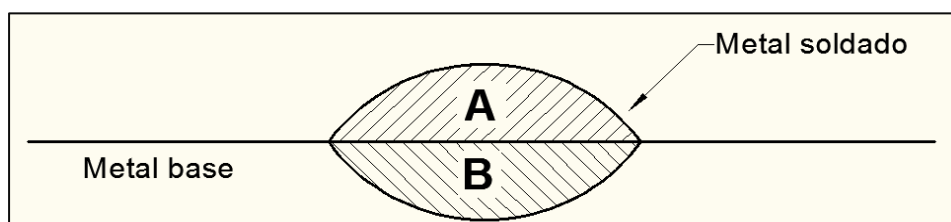
La dilución es la cantidad de metal de aporte, que se mezcla con el metal base durante la soldadura. Durante la soldadura por fusión, el metal de cada una de las partes a unir y el aporte (si se utiliza) se funden conjuntamente formando el baño de fusión o metal de soldadura. Tras la posterior solidificación, el metal de soldadura resultante tendrá una sola fase o una mezcla de dos fases.

Para cualquier composición de metal de aporte dada, los cambios en el procedimiento de soldadura pueden causar variaciones en la dilución.

En la figura 14, se muestra esquemáticamente las zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución.

Figura 14

Zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución



Fuente: Fosca (2007)

El grado de dilución se puede estimar de acuerdo a la siguiente ecuación 13 y 14.

$$\% \text{ dilucion} = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad \text{Ec. 13}$$

$$\% \text{ Dilución} = \frac{\text{Área sombreada}}{\text{Área total del cordón de soldadura}} \times 100 \quad \text{Ec. 14}$$

En la tabla 5, se muestran los niveles de dilución para diferentes procesos de soldadura.

Tabla 11*Niveles de dilución de los procesos de soldadura*

Proceso	Dilución (%)	Observaciones
Electro escoria	100	El metal base contribuye con la zona fundida-
Soldadura por haz de electrones	100	Excepto si se emplea hilo de aporte
Soldadura laser	100	Excepto si se emplea hilo de aporte
Arco eléctrico manual (SMAW)	20 – 30	En general
	30 – 40	Pasada de raíz
	10 - 20	En depósitos (overlay)
Arco sumergido	25-50	En general
	10 - 15	En depósitos (overlay)
MIG/MAG (GMAW)	25 – 50	Arco “spray”
	15 - 30	Arco “Arco cortocuito”
TIG (GTAW)	20 – 50	
	100	Sin material de aporte

Fuente: Fosca (2007)

2.10.1 Variables de Soldadura que Afectan la Dilución

Gran cantidad de depósitos se realiza con los procesos de soldadura por arco eléctrico. Debido a la importancia de la dilución, es necesario conocer el efecto de cada variable. Las mismas son:

a) Amperaje

Incrementando el amperaje (densidad de corriente) aumenta la dilución. El arco es más caliente y rígido, la penetración es más profunda y mayor es la fusión del metal base.

Incrementando el amperaje (densidad de corriente) aumenta la dilución. El arco es más caliente y rígido, la penetración es más profunda y mayor es la fusión del metal base.

b) Polaridad

Con corriente directa con polo negativo al electrodo (CDEN) da menos penetración y, por lo tanto, menor dilución que con el electrodo al polo positivo (CDEP). Alternando las corrientes da diluciones intermedias a ambas.

c) Diámetro del electrodo:

Diámetros pequeños de electrodo significan menores amperajes y por lo tanto menor dilución. En soldadura por arco bajo protección gaseosa, para un dado amperaje, diámetros grandes de electrodo (y bajas densidades de corriente) dan diluciones más bajas si el mayor diámetro resulta en transferencia globular; mientras que los diámetros más pequeños resultan en transferencia de rocío. Con otros procesos de soldadura el resultado puede variar.

d) Extensión del electrodo:

Un electrodo largo disminuye la dilución (para procesos con electrodo consumible) por incremento en la velocidad de fusión del electrodo (calor) y la difusión de la energía del arco mientras ésta afecte sobre el metal base. A la inversa, un electrodo corto incrementa la dilución, dentro de ciertos límites.

e) Paso o separación de cordones:

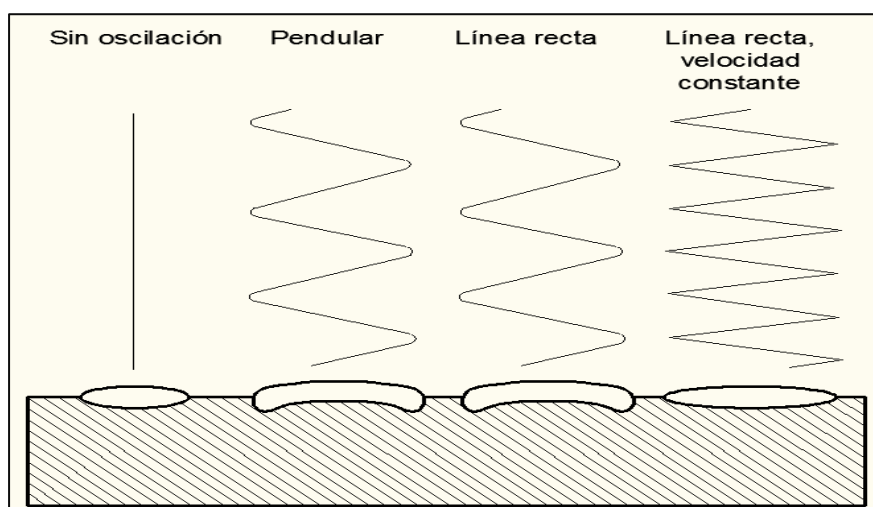
Una ajustada separación entre cordones (mayor superposición) reduce la dilución debido a que mayor cantidad de cordones previos y menor material base se refunden e incorporan a la pileta líquida. Una amplia separación de cordones (menor superposición) incrementa la dilución.

f) Oscilación del electrodo:

Cuando se oscila ampliamente el electrodo, se obtienen cordones anchos y de menor penetración, por lo que es menor la dilución; los cordones finos, estirados, producen máxima dilución. La frecuencia de oscilación también afecta la dilución, como regla se puede indicar que a mayor frecuencia de oscilación existirá menor dilución. En la figura 19, se puede observar el efecto que tiene el tipo de oscilación en el depósito.

Figura 15

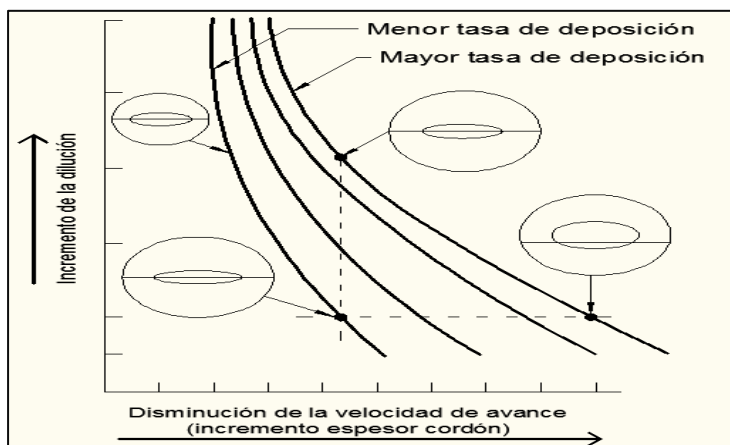
Tipos de oscilación y su efecto en el cordón de soldadura



Fuente: Fosca (2007)

g) Velocidad de avance

En la figura 16, se muestra el efecto de la velocidad de avance en la dilución. Un decaimiento en la velocidad de avance disminuye la cantidad de metal fundido por unidad de tiempo (t) y/o distancia e incrementa la cantidad de recargue agregado: esto reduce la dilución. Esta reducción se genera por el cambio de forma del cordón y el espesor y por el hecho de que la fuerza del arco es ejercida sobre la pileta líquida más que sobre el metal base.

Figura 16*Efecto de la velocidad de avance sobre la dilución*

Fuente: Fosca (2007)

h) Posición de soldadura e inclinación de la pieza de trabajo.

Este efecto tiene una importante influencia sobre la dilución. Dependerá de la posición o la inclinación de la pieza de trabajo.

2.11 Composición Química del Cordón de Soldadura

En cuanto a la composición química del cordón de soldadura es preciso conocer las relaciones de dilución y las composiciones químicas del metal base y de aporte.

En ese sentido la composición de un elemento de aleación específico en el cordón de soldadura diluido se calcula mediante la ecuación.

$$XW = (DA) (XA) + (DB) (XB) + (1 - DT) (XA_{aporte}) \quad (Ec. 15)$$

Donde:

XW = Porcentaje promedio del elemento X en el depósito de soldadura

XA = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A

X_B = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base B

D_A = Porcentaje de dilución del metal base A, expresado en decimal

D_B = Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal

D_T = Porcentaje de dilución total, expresado en decimal

Dado que el objetivo de la investigación es encontrar el metal de aporte adecuado para la soldadura sobre un material base (overlay), la ecuación 16 se simplifica a:

$$X_{\text{aporte}} = X_W - (D_A)(X_A) / (1 - D_A) \quad (\text{Ec.16})$$

2.12 Ensayos no destructivos

En un recubrimiento overlay, los ensayos no destructivos (END) más comunes que se realizan son:

2.12.1 Inspección Visual (VT - Visual Testing)

- La inspección visual es el primer método no destructivo empleado por el hombre. En la actualidad la inspección visual es el procedimiento más importante de prueba para la detección y evaluación de defectos, donde el humano utiliza los sentidos apoyados únicamente con algún dispositivo que magnifique la capacidad sensorial del inspector. Este proceso de inspección puede constituirse por acciones, como mirar, oír, palpar, oler, agitar o mezclar. La inspección visual consiste en verificar la calidad de las superficies, durante y después del proceso de fabricación de los elementos metálicos, detectando discontinuidades en uniones como soldadura, sellados, etc

2.12.1.1 Ventajas y limitaciones del método de VT

Las ventajas y limitaciones de la inspección visual son expresadas a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12

Ventajas y limitaciones del método de VT

Ventajas	Limitaciones
• Método de bajo costo	• Solamente se pueden inspeccionar discontinuidades superficiales. Hay que considerar las limitaciones de la visión humana.
• Aplicable en todo proceso productivo	• Se requiere una fuente efectiva de iluminación.
• Se realiza en forma rápida y sencilla	• Es necesario el acceso a la superficie a inspeccionar.
• La geometría de piezas no representa ningún problema	• Se requiere de personal capacitado y experimentado para realizar el proceso de inspección.

2.12.1.2 Criterios de aceptación

Para una calificación aceptable, las soldaduras deben satisfacer los siguientes requisitos:

(1) La soldadura debe estar libre de grietas.

(2) Todos los cráteres deben estar llenos completamente en la sección transversal de la soldadura.

(3) La cara de la soldadura debe estar llena hasta el borde de la superficie del metal base y la soldadura se debe fundir lentamente con el metal base. El socavado no debe exceder de 1/32 Pulg. (1 mm). El refuerzo de la soldadura no deberá exceder de 1/8 Pulg. (3mm).

(4) La raíz de la soldadura debe ser inspeccionada y no debe tener evidencia de grietas, fusión incompleta o penetración inadecuada de la junta. Se permite una raíz de superficie cóncava

dentro de los límites descritos presentados abajo, de tal manera que el espesor total de la soldadura sea igual o mayor que el del metal base.

(5) La máxima concavidad de la superficie de la raíz debe ser de 1/16 Pulg. (1.6mm) y el máximo sobre espesor debe ser 1/8.(3mm). Para uniones tubulares en T, Y y K el sobre espesor de la raíz, se considera adecuado y no deberá ser causa de rechazo.

2.12.2 Líquidos Penetrantes (PT - Penetrant Testing)

- Ideal para detectar grietas y poros abiertos en la superficie del recubrimiento.
- Se usa en recubrimientos no ferromagnéticos, como los de aleaciones a base de níquel o cromo.

2.12.3 Partículas Magnéticas (MT - Magnetic Testing)

Se aplica en recubrimientos ferromagnéticos para detectar grietas superficiales y subsuperficiales.

2.12.4 Ultrasonido (UT - Ultrasonic Testing)

Permite evaluar el espesor del recubrimiento y detectar falta de unión (lack of fusion) entre el overlay y el sustrato. Puede usarse la técnica Phased Array (PAUT) para un mapeo más detallado.

2.12.5 Corrientes Inducidas (ET - Eddy Current Testing)

Se usa en recubrimientos no ferromagnéticos para detectar grietas superficiales o subsuperficiales.

2.12.6 Radiografía (RT - Radiographic Testing)

Detecta porosidad interna, falta de fusión y grietas en el overlay.

Es útil en recubrimientos gruesos o aplicados mediante procesos como soldadura por arco.

2.13 Ensayos Destructivos

Exigen la destrucción de la pieza soldada, para examinar su estructura interna del metal base y metal aportado, en otros casos en probetas tomadas de la soldadura para determinar las propiedades mecánicas de la junta o de sus diferentes partes.

2.13.1 Ensayo de dureza

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación permanente (plástica) en su superficie, o sea la resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado.

En las uniones soldadas se determina la dureza, en la mayoría de los casos en la zona afectada por el calor (ZAC), para evitar riesgos de fisuraciones generadas por las altas temperaturas que se dan y por los enfriamientos rápidos que puedan ocurrir; es por esto que se realizan los ensayos de dureza en la zona más frágil o crítica con el fin de poder programar los correspondientes controles como, por ejemplo, el precalentamiento de las piezas.

Se utilizan diferentes fórmulas para determinar el valor de la dureza. Se distinguen las siguientes escalas de dureza: Brinell, Vickers, Knoop, y Rockwell.

Dureza Rockwell (Hardness Rockwell Series C.)

El estándar ASTM E 18-03 define la dureza Rockwell como un método de ensayo por indentación por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza un indentador cónico-esferoidal de diamante (penetrador de diamante), o una bola de acero endurecido (acero o carburo de tungsteno), bajo condiciones específicas contra la superficie del material a ser ensayado, en dos

operaciones, y se mide la profundidad permanente de la impresión bajo condiciones específicas de carga.

El estándar ASTM E18-03 (Métodos de prueba estándar para la dureza de Rockwell de materiales metálicos) define el número de dureza Rockwell como un número derivado del incremento neto en la profundidad del indentador cuando la fuerza en el indentador es incrementada desde una fuerza previa (preliminar específico) hasta una fuerza total (específica) y luego retornada al valor de fuerza previa. En la tabla 13, se observa las diferentes escalas de dureza Rockwell.

Tabla 13

Escalas de dureza Rockwell

Símbolo de la escala	Penetrador	Carga total (kg)	Aplicaciones
A	Diamante	60	Aceros tratados y sin tratar. Materiales muy duros. Chapas duras y delgadas.
B	Esfera de 1/16 pulgada	100	Aceros recocidos y normalizados.
C	Diamante	150	Aceros tratados térmicamente.
D	Diamante	100	Aceros cementados.
E	Esfera de 1/8 pulgada	100	Metales blandos y antifricción.
F	Esfera de 1/16 pulgada	60	Bronce recocido.
G	Esfera de 1/16 pulgada	150	Bronce fosforoso y otros materiales.
H	Esfera de 1/8 pulgada	60	Metales blandos con poca homogeneidad, fundiciones con base hierro.
K	Esfera de 1/8 pulgada	150	Aplicaciones análogas al tipo anterior.

Ventajas:

- No es necesaria la preparación de la probeta (corte, pulido, incrustación).

- Permite una lectura directa del valor de dureza, sin necesidad de evaluación óptica (medición de las diagonales como en los métodos ópticos).
- Es un procedimiento rápido (ciclo de ensayo corto) y barato (las máquinas de ensayo de dureza son comparativamente baratas porque no tienen que estar equipadas con ópticas complejas como las máquinas para los procedimientos ópticos Brinell, Vickers y Knoop).
- Es un ensayo no destructivo, la pieza puede ser reutilizada.

Desventajas

- No siempre es el método más preciso del ensayo de dureza, ya que incluso un pequeño error en la medición de la diferencia de profundidad provoca un gran error en el valor de dureza obtenido.
- El lugar del ensayo debe estar libre de cualquier contaminación (por ejemplo, cascarilla, cuerpos extraños o aceite) para obtener un resultado significativo del ensayo.
- El indentador puede tener efectos no conocidos sobre el resultado del ensayo, por ejemplo, si está desgastado y el cono ya no cumple los requisitos de la norma (especificaciones de la norma: Para minimizar los efectos, utilice únicamente indentadores certificados y calibrados).
- Si aumenta la dureza, los materiales son difíciles de diferenciar.

2.13.2 Ensayo de Doble

La finalidad de este ensayo es determinar la ductilidad y la calidad del material de la soldadura, se realiza mediante el doblado de la probeta en forma de u, para luego examinar la zona doblada, se utiliza este ensayo para calificar procedimiento, habilidad de soldadores y operadores de máquinas de soldar: Los ensayos de doblez pueden ser: Doble transversal de lado

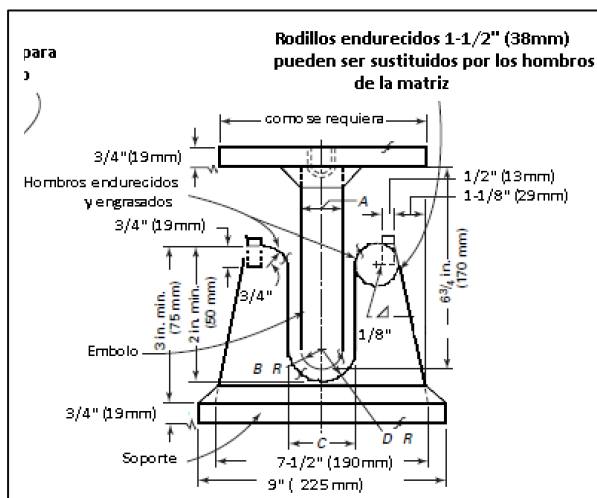
- Doble transversal de raíz

- Doble transversal de cara
- Doble longitudinal de cara
- Doble longitudinal de raíz (CESOL 2013).

En las figuras 17 y 18, se puede observar el dispositivo para de ensayo de doblez y el doblez de cara y raíz.

Figura 17

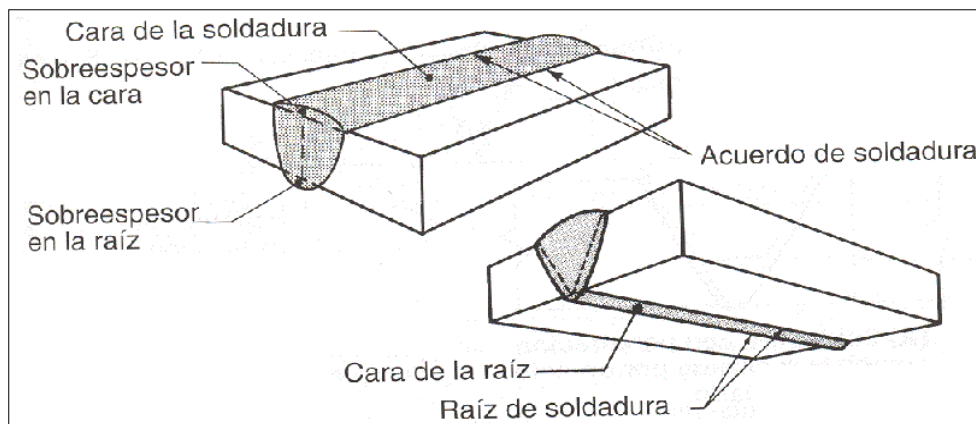
Dispositivo (matriz) para doblez de probetas



Fuente: ASME Sección IX 2015

Figura 18

Soldadura en cara y raíz



Fuente: ASME Sección IX 2015

La probeta debe ser colocada en el dispositivo estático de la guía, con la soldadura en el centro. Las probetas para doblez de cara deben ser colocadas con la cara de la soldadura directamente hacia la abertura. Las probetas para doblez de raíz, deben ser colocadas con la raíz de la soldadura dirigida hacia la abertura.

El macho debe forzar la probeta dentro de la matriz hasta que la probeta siente y se forme una U. La soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC), deben estar centradas y ubicadas completamente dentro de la parte doblada de la probeta después del ensayo. Cuando se utilice la guía de enrollado, la probeta debe estar sujeta firmemente en uno de sus extremos, de tal manera que no se deslice durante la operación de doblez. Después del ensayo, la soldadura y la zona afectada por el calor deben estar completamente en la parte doblada de la probeta. Las probetas ensayadas deben quitarse de guía cuando el rodillo se ha retirado y ha sido movido 180° del punto de arranque.

Para cualquiera de estos ensayos de doblado, las probetas deben ser preparadas cuidadosamente para prevenir cualquier imprecisión en el ensayo.

2.14 Calificación del Procedimiento

Antes de realizar una soldadura de será establecido y calificado un documento detallado del procedimiento para garantizar que la soldadura presente adecuadas propiedades. La calidad de la soldadura debe ser probada por ensayos destructivos y no destructivos.

2.14.1 Especificación del Procedimiento de Soldadura o WPS (Welding Procedure Specification)

Documento preparado por el departamento técnico o de ingeniería de la empresa, en el cual se proyectan los valores numéricos de las variables para realizar una soldadura. Brinda información

relevante para orientar al soldador u operador de soldadura y, para asegurar el cumplimiento de los requerimientos del código. Describe las variables esenciales, las no esenciales, y cuando se requiera las variables suplementarias esenciales de cada procedimiento de soldadura. Debe ser desarrollado en un formato en donde se diligencien todos los campos, y con la firma de validación por el responsable de soldadura.

2.14.2 Registro de la Calificación del Procedimiento o PQR (Procedure Qualification Record)

Documento que valida y califica un WPS; en él se registran los valores reales medidos de las variables del procedimiento de soldadura, mediante la ejecución de una soldadura de calificación en un cupón de prueba estandarizado; el PQR es el documento donde se registra los resultados a soldar y ensayar las probetas o cupones.

2.14.3 El Registro de la Calificación de la Habilidad del Soldador o WPQR (Welder Performance Qualification Record)

Es un documento que registra los ensayos de calificación de desempeño requeridos por el código, para determinar la habilidad de los soldadores, para producir soldaduras sanas.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Maquinaria, Equipos, Herramientas

3.1.1 Máquina de Soldar

Para la experimentación se usó una fuente de poder existente en el taller de soldadura (figura 18) de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, cuyas características son:

- Marca: MILLER
- Modelo: XMT 304 CC.
- Salida nominal de corriente: 300 Amperios
- Gama de Voltaje: 10 – 35 Voltios.
- Gama de Amperage : 5 - 400
- Máx Voltaje de circuito abierto CD: 90 V.

En la figura 19, se puede observar la fuente de poder usada.

Figura 19

Fuente de poder



3.1.2 Durómetro Equotip 2

Es un durómetro portátil, liviano de gran uso para todos los materiales metálicos. Mide el valor de Leeb (L) para materiales, que es una relación entre la velocidad de impacto y la velocidad de rebote. Móvil y muy preciso, tiene un amplio rango de medición, desde blando hasta extremadamente duro. Con mediciones en segundos, el Equotip 2 puede mostrar lecturas en otros rangos de prueba de dureza HS, HV, HRB y HRC. Las mediciones de dureza se realizan mediante un método dinámico, que permite realizar pruebas en zonas de difícil acceso.

Características:

- Capacidad para realizar mediciones a mano alzada en piezas grandes.
- Rapidez y buena reproducibilidad.
- Muy buena selectividad, gracias a una pequeña.
- Funcionamiento sencillo y comodo.
- Conversiones integradas en otras escalas.

En la figura 20 se observa el equipo.

Figura 20

Durómetro Equipo 2



3.1.3 Equipo de Doble en “U”

Este equipo soporta hasta 20 toneladas con una altura mínima de 23 cm y una máxima de 30 cm. Es ideal para trabajos en distintas superficies y entornos industriales. En la figura 25.

Figura 21

Equipo para prueba de doblez en U



3.2 Material de Prueba y Material de Aporte

3.2.1 Material de Prueba

Para el proceso experimental se utilizó el acero ASTM 516 Grado 70, cuya composición química y propiedades mecánicas se observan en la tabla 3. En la figura 22, se observa las probetas para las pruebas respectivas.

Figura 22*Probetas para experimentación*

3.2.2 *Material de Aporte*

Se utilizó los siguientes electrodos:

a) AWS E308L-16

Es un electrodo rutilico para soldar aceros tipo 19Cr10Ni. También es adecuado para soldar aceros estabilizados de composición similar, excepto cuando se debe cumplir con la resistencia a la deformación total del material base. (Su ficha técnica se encuentra en el anexo 4)

- **Aplicaciones:**

Fabricación y reparación de intercambiadores de calor, quemadores, tuberías, ejes, válvulas, bombas, estampas, cuchillas, matrices, componentes de hornos (ganchos, canastillas, guías, bastidores y cadenas), matrices, tornillos extrusores, equipos para la industria minera, petroquímica, textil, alimenticia, ferroviaria, fundiciones, cementeras, acerías, etc. La composición química del depósito y sus propiedades mecánicas del depósito se visualizan en las tablas 14 y 15.

Tabla 14*Composición química del depósito*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,021	0,90	0,80	máx. 0,025	máx. 0,025	-	9,5	19	-	-

Fuente: Oerlikon (2010)

Tabla 15*Propiedades mecánicas*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	550 – 650 (79 750 – 94 250)	> 350 (50 750)	> 35	> 50

Fuente: Oerlikon (2010)

b) AWS E312-16

Electrodo cuyo depósito tiene una estructura austeno-ferrítica con Ferrita > 20%, insensible a la fisuración en caliente. El material depositado presenta una alta resistencia a la rotura y es muy empleado para soldar aceros de difícil soldabilidad y unir aceros disímiles. El revestimiento rutílico le permite obtener depósitos libres de poros y con buen acabado. El AWS E312-16 es resistente al impacto, calor, corrosión y a la fricción metal-metal. Los depósitos son maquinables. (Su ficha técnica se encuentra en el anexo 5)

Aplicaciones:

- Electrodo especial ideal para labores de mantenimiento y reparación, en todos los sectores
- industriales.
- Para soldar aceros al carbono y aceros aleados con problemas de soldabilidad (aceros de difícil soldabilidad).

- Para soldar una gran variedad de aceros: herramientas, tratados térmicamente, inoxidable y rápidos.
- Ideal para soldar aceros disímiles, unir acero al carbono con acero inoxidable y planchas de acero galvanizado.
- Para recuperar ejes, matrices, moldes, herramientas, cadenas, engranajes, paletas de agitadores, cremalleras, tornillos extrusores y en general, piezas de alta resistencia.
- Como base para recubrimientos protectores especiales.
- Muy usado en la industria siderúrgica (resistente al descascaramiento hasta 110°C) para relleno de ejes, mandriles, rodillos, cama cojin para cuchillas de corte en caliente, etc. En las tablas 16 y 17 se visualiza la composición química y las propiedades mecánicas.

Tabla 16*Composición química del deposito*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,10	1,00	0,90	máx. 0,025	máx. 0,020	0,5	10,00	29,00	-	-

Fuente: Oerlikon (2010)

Tabla 17*Propiedades mecánicas*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	740 - 840 (107 300 - 121 800)	> 600 (87 000)	> 25	-

Fuente: Oerlikon (2010)

c) AWS E309L-16

Electrodo del tipo rutílico, de estructura austenítica con contenido de ferrita >9%, lo que le confiere alta resistencia a la fisuración. El material depositado posee características similares a un AISI 309 L. Presenta gran resistencia a la corrosión, fricción metal - metal y soporta altas temperaturas. Tiene excelentes propiedades mecánicas y se auto endurecen en trabajo. (Su ficha técnica se encuentra en el anexo 6)

Aplicaciones:

- Para soldar aceros inoxidables AISI 309 L y cualquiera del tipo 18/8, donde se requiera alta resistencia.
- Para relleno de ejes de acero al carbono o de baja aleación, donde se necesita, además de buena soldabilidad, buena resistencia a la fricción metálica.
- Ideal para realizar uniones discímiles entre acero al carbono con acero inoxidable y acero inoxidable austenítico con acero inoxidable ferrítico.
- Para soldar y recubrir aceros al manganeso y aceros de difícil soldabilidad.
- Para unir aceros al manganeso con aceros de baja aleación o aceros al carbono.
- Para revestimiento de torres de craqueo.
- Fabricación y reparación de cajas para carburación, tuberías para conducción de fluidos corrosivos, etc.

En las tablas 18 y 19 se visualiza la composición química y las propiedades mecánicas

Tabla 18*Composición química del depósito*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
< 0,04	1,20	0,90	máx. 0.025	máx. 0.020	máx. 0,75	12,00 14,00	22,00 25,00	-	-

Fuente: Oerlikon (2010)

Tabla 19*Propiedades mecánicas*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20 °C) [J]
Sin tratamiento	570 – 640 (82 650 – 92 800)	360 - 440 (92 200 - 63 800)	> 30	> 50

Fuente: Oerlikon (2010)

d) AWS E316L-16

Electrodo rutílico para soldar aceros inoxidables con contenidos de 16-20%Cr/10-14%Ni/2-3%Mo. El extra bajo contenido de carbono ($0,03\% > C$) disminuye la precipitación de carburos de cromo, característica importante en los inoxidables que van a estar expuestos a ácidos altamente corrosivos. El contenido Cr le confiere gran resistencia a la corrosión y oxidación inclusive a temperaturas elevadas, el contenido de Ni además de estabilizar la austenita mejora notablemente las propiedades mecánicas y el contenido de Mo mejora la resistencia a la corrosión en medios ácidos aumentando las características mecánicas. Es un electrodo clásico de estructura austeno-ferrítica, de gran resistencia a la fisuración en caliente. Su revestimiento especial le permite obtener depósitos de buen acabado, con fácil remoción de escoria y soldar con bajos amperajes. (Su ficha técnica se encuentra en el anexo 7)

Aplicaciones

- Para soldar aceros AISI 316 L, 317 L, 318 L.
- Para fabricar recipientes, ductos o tuberías que están expuestos a los ataques químicos por sales o ácidos, donde a la vez de resistencia a la tracción se requiere resistencia a la corrosión, oxidación y/o temperatura.
- Empleado en la industria petroquímica, farmacéutica, textil, alimenticia, etc.
- Usado como base para aplicar cierto tipo de recubrimientos protectores.
- Excelente comportamiento en aplicaciones criogénicas.

En las tablas 20 y 21 se visualiza la composición química y las propiedades mecánicas.

Tabla 20

Composición química del deposito

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,03	0,80	0,70	máx. 0,025	máx. 0,020	2,5	12,00 14,00	17,00 20,00	-	-

Fuente: Oerlikon (2010)

Tabla 21

Propiedades mecánicas

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	560 – 660 (81 200 – 95 700)	> 380 (55 100)	> 30	> 50

Fuente: Oerlikon (2010)

En la figura 35, se observa los diferentes tipos de material de aporte usados en la experimentación.

Figura 23*Tipos de electrodos*

El resumen de la composición química de los electrodos usados se muestra en la tabla 22.

Tabla 22*Composición química (en %) de electrodos*

Electrodo (AWS)	C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr
E308L-16	0.021	0.90	0.80	Max. 0.025	Max. 0.025	--	9.5	19.00
E312-16	0.10	1.00	0.90	Max. 0.025	Max. 0.020	0.5	10.0	29.00
E309L-16	<0.04	1.20	0.90	Max. 0.025	Max. 0.020	Max. 0.75	12-14	22-25
E316L-16	0.03	0.80	0.70	Max. 0.025	Max. 0.020	2.5	12-14	17-20

3.3 Características de las Probetas

En la tabla 23, se observa las dimensiones de las probetas objeto de investigación:

Tabla 23*Dimensiones de las probetas*

Clase de Acero	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
ASTM A516 Grado 70	200	120	4.725

En la figura 24, se muestra las probetas utilizadas para la experimentación.

Figura 24

Probetas para experimentación



3.4 Cálculo de Carbono Equivalente

La soldabilidad de los aceros se evalúa mediante el parámetro denominado “carbono equivalente” (CE). Para la soldadura de las probetas se estimó este cálculo, el cual se muestra en la tabla.

Tabla 24

Cálculo del carbono equivalente

TABLA DE CÁLCULO CARBONO EQUIVALENTE			
ACEROS AL CARBONO			
Elemento químico		%	<i>Introducir los porcentajes de cada uno de los elementos indicados</i>
(C)	Carbono	0.3	
(Mn)	Manganeso	1.3	
(Cu)	Cobre		
(Ni)	Niquel		
(Cr)	Cromo		
(Mo)	Molibdeno		
(V)	Vanadio		
(Si)	Silicio	0.4	
Carbono equivalente (Ceq) - AWS		0.583%	$Ceq = C + [(Mn+Si)/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15]$ (fórmula larga incluye Si)
Carbono equivalente (Ceq) - O'Neill		0.517%	$Ceq = C + [(Mn)/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15]$ (fórmula larga)
Carbono equivalente (Ceq) - f.corta		0.625%	$Ceq = C + [(Mn)/4]$ (fórmula corta)

El valor de carbono equivalente (CE) obtenido, implica que el acero ASTM A516 grado 70 para su soldabilidad debe ser precalentado.

3.5 Cálculo de la temperatura de precalentamiento (método de Seferian)

Para el cálculo de la temperatura de precalentamiento se usó la ecuación de SEFERIAN.

$$C_t = C_e + C_s$$

$$C_e = 0.31 + \frac{1,20}{9} = 0.443$$

$$C_s = 0.005 * 6,35 * 0,443 = 0.01406525$$

$$C_t = 0.443 + 0.01406525 = 0.4571$$

$$T_p = 350 \sqrt{0.4571 - 0.25} = 159.27$$

3.6 Recomendaciones Para Realizar la Soldabilidad de las Probetas

Para realizar un depósito Overlay (recubrimiento por soldadura), es fundamental seguir ciertas recomendaciones para garantizar la calidad, adherencia y propiedades del recubrimiento. A continuación, se presentan las mejores prácticas:

- Limpieza de las probetas.
- Realizar un cordón de soldadura a lo largo de la pieza, manteniendo una trayectoria recta.
- Remover la escoria antes de aplicar el siguiente cordón.
- Depositar un segundo cordón en paralelo al primero, asegurando una superposición de aproximadamente un tercio de su ancho.

- Continuar el proceso de soldadura de la misma manera hasta lograr una superficie uniforme de metal depositado.

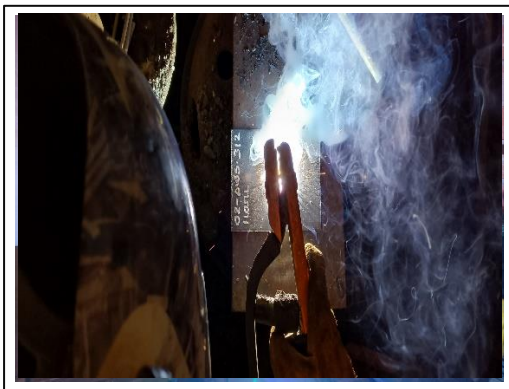
3.7 Soldabilidad de las Probetas

Para la soldabilidad se confeccionaron los WPS para las doce probetas, los que se muestran en el anexo 1.

Con las variables y parámetros mostrados en el anexo 1, se llegaron a soldar las probetas, tal como se muestra en la figura 25.

Figura 25

Soldabilidad de las probetas



3.7.1 Cálculo de Calor Neto Aportado

Los cálculos realizados se muestran en el anexo 2.

En la tabla 25 se resume los valores calculados del calor neto aportado en la soldabilidad de las probetas.

Tabla 25*Calor neto aportado en la soldabilidad de las probetas*

Probeta	Electrodo	Intensidad de corriente (A)	Tensión eléctrica (V)	Veloc. De soldeo (mm/seg)	Calor neto aportado (j/mm)
1	E-308L-16	80	21	3.4	370.60
2	E-308L-16	95	22	3.9	401.90
3	E-308L-16	115	23	4.3	461.38
1	E-312-16	80	21	3.4	370.60
2	E-312-16	95	22	3.9	401.90
3	E-312-16	115	23	4.3	461.38
1	E-309L-16	80	21	3.4	370.60
2	E-309L-16	95	22	3.9	401.90
3	E-309L-16	115	23	4.3	461.38
1	E-316L-16	80	21	3.4	370.60
2	E-316L-16	95	22	3.9	401.90
3	E-316L-16	115	23	4.3	461.38

3.7.2 Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC)

En el marco teórico fue desarrollada la ecuación del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC), y fue calculado a partir de la ecuación 3.

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_o} \right) \right] \times \left[\frac{H_{neto}}{4.13 \times \rho \times C_{xt}} \right] \quad [ec. 17]$$

Donde:

Y = ancho de la ZAC (mm)

T_{max} = Temperatura máxima en la zona adyacente al ZAC (°C)

T_o = Temperatura inicial del material (°C)

T_{fusión} = Temperatura de fusión (°C)

ρ = Densidad del material (g/mm³)

C = Calor específico del metal sólido (J/g. °C)

t = Espesor del material (mm)

Hneto = Calor neto (J/mm)

Los datos para el caso del acero se tienen los siguientes datos:

- Temperatura de fusión: $T_{\text{fusión}} = 1500^{\circ}\text{C}$
- Temperatura máxima: $T_{\text{max}} = 723^{\circ}\text{C}$
- Temperatura inicial: $T_0 = 159^{\circ}\text{C}$
- Espesor del material: $t = 4.725 \text{ mm}$
- Calor específico volumétrico (ρC) = **0.00385 J/mm**

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 159} \right) - \left(\frac{1}{1500 - 159} \right) \right] \times \left[\frac{370.6}{4.13 \times 0.00385 \times 4.725} \right] = 5.06 \text{ mm}$$

Probetas soldado con 95 amperios

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 159} \right) - \left(\frac{1}{1500 - 159} \right) \right] \times \left[\frac{401.9}{4.13 \times 0.00385 \times 4.725} \right] = 5.50 \text{ mm}$$

Probeta soldados con 115 amperios.

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 159} \right) - \left(\frac{1}{1500 - 159} \right) \right] \times \left[\frac{461.38}{4.13 \times 0.00385 \times 4.725} \right] = 6.31 \text{ mm}$$

En la tabla 26 se resume el ancho de la ZAC.

Tabla 26*Ancho de la ZAC*

Probeta	Electrodo	Calor neto aportado (j/mm)	Ancho ZAC (mm)
1	E-308L-16	370.60	5.06
2	E-308L-16	401.90	5.50
3	E-308L-16	461.38	6.31
1	E-312-16	370.60	5.06
2	E-312-16	401.90	5.50
3	E-312-16	461.38	6.31
1	E-309L-16	370.60	5.06
2	E-309L-16	401.90	5.50
3	E-309L-16	461.38	6.31
1	E-316L-16	370.60	5.06
2	E-316L-16	401.90	5.50
3	E-316L-16	461.38	6.31

3.7.3 Determinación de la Dilución

De acuerdo a los valores de calor neto, mostrados en la tabla 27, se calculó las áreas respectivas, para el cálculo del coeficiente de dilución. Dichos valores se muestran en la tabla 13.

Tabla 27*Valores del coeficiente de dilución*

Probeta	Electrodo	Calor neto aportado (j/mm)	Área del depósito (mm ²)	Área total del cordón de soldadura (mm ²)	Coeficiente de dilución (%)
1	E-316L-16	370.6	30.5	162.0	25.70
2	E-316L-16	401.90	34.0	170.5	20.00
3	E-316L-16	461.38	37.8	172.00	22.00
1	E-309L-16	370.60	31.8	165.0	19.27
2	E-309L-16	401.90	34.8	172.5	20.17
3	E-309L-16	461.38	38.0	178.0	21.30
1	E-312-16	370.60	32.7	175.92	18.60
2	E-312-16	401.90	36.7	182.5	20.00
3	E-312-16	461.38	42.5	189.5	22.95
1	E-308L-16	370.60	34.6	170.0	20.00
2	E-308L-16	401.90	38.0	186.5	20.37
3	E-308L-16	461.38	41.00	182.0	22.52

3.7.4 Cálculo de la composición química del electrodo seleccionado.

Para el cálculo de la composición química se calculó de acuerdo a la ecuación 15.

En la tabla 28 se tiene las composiciones químicas del material base y de los materiales de aporte disponibles.

Tabla 28

Composiciones químicas del material base y del material de aporte

Material	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	% Ni	%Mo	%
ASTM A516 Grado 70	0.31	1.20	0.15- 040	0.035	0.035	0.020	-----	-----	
Material de aporte									
E-316L-16	0.03	0.80	0.70	0.025 max.	0.020 max.	17.0 20.0	12.0- 14.0	2.5	
E 309L-16	0.04	1.20	0.90	0.025 max.	0.020 max.	---	12-14	0.75 max.	
E 312-16	0.10	1.0	0.90	0.025 max.	0.020 max.	29.0	10.0	0.5	
E 308L-16	0.021	0.90	0.80	0.025 max.	0.025 max.	19.0	9.5	-----	

El cálculo de las composiciones químicas para las diferentes intensidades de corriente se muestra en el anexo 3.

En la tabla 29, se resume la composición química de los depósitos realizados con diferentes electrodos.

Tabla 29*Resumen de la composición química de los depósitos con diferentes electrodos*

Electrodo	Intensidad de corriente (Amperios)	C (%)	Mn(%)	Si(%)	S(%)	P(%)	Cu(%)	Ni(%)	Mo(%)
E-316L-16	80	0.084	0.88	0.62	0.023	0.027	0.019	10.5	2.0
	95	0.086	0.88	0.61	0.023	0.027	0.019	10.4	2.0
	115	0.086	0.88	0.62	0.084	0.027	0.019	10.5	2.02
E 309L-16	80	0.084	0.88	0.62	0.023	0.027	0.019	10.5	2.02
	95	0.086	0.88	0.61	0-023	0.027	0-019	10.4	2.0
	115	0.089	0.88	0.61	0.023	0.027	0.019	10.23	1.97
E 312-16	80	0.082	0.84	0.62	0.023	0.027	0.019	10.58	2.04
	95	0.086	0.88	0.62	0.023	0.027	0.019	10.4	2.0
	115	0.094	0.89	0.60	0.023	0.027	0.019	10.2	1.92
E 308L-16	80	0.086	0.88	0.62	0.023	0.027	0.019	10.4	2.0
	95	0.087	0.88	0.61	0.023	0.027	0.019	10.35	1.97
	115	0.093	0.89	0.60	0.0223	0.027	0.019	10.72	1.72

3.8 Control de Calidad de las Probetas

3.8.1 Inspección Visual de las Probetas Soldadas

Una vez realizados los depósitos sobre las probetas, se procedió a efectuar una inspección visual con el propósito de seleccionar la más adecuada para su posterior análisis.

Este tipo de inspección permite evaluar la calidad del depósito y representa una herramienta fundamental dentro del control de calidad práctico.

La inspección visual, considerada el método no destructivo más común, facilita la detección de discontinuidades en las superficies que pueden ser observadas directamente.

Gracias a su simplicidad y amplio alcance, es una técnica ampliamente utilizada en la evaluación inicial de componentes y uniones soldadas. En la tabla 30 se detallan los resultados del examen visual.

Tabla 30*Resultados de la inspección visual*

Electrodo	Intensidad de corriente (Amperios)		Discontinuidad	Observación
E-316L-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
E 309L-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
E 312-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
E 308L-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado

3.8.2 Prueba de Doble

El objetivo de realizar una prueba de doblado en soldadura es evaluar la ductilidad y la integridad de la unión soldada, asegurando que no existan defectos internos como: Fisuras, falta de fusión, inclusiones de escoria y porosidad interna. Esta prueba somete la soldadura a esfuerzos de tracción en la zona doblada para verificar que el material puede deformarse plásticamente sin fracturarse.

3.8.2.1 Criterios de aceptación para ensayos de doblez.

Las superficies convexas de las muestras para ensayo de doblez deberán ser inspeccionada visualmente para verificar discontinuidades superficiales. Para su aceptación, la superficie no debe tener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones:

- a) 1/8 Pulg. (3mm) medida en cualquier dirección sobre la superficie.
- b) 3/8 Pulg. (10mm). La suma de las mayores dimensiones de todas las discontinuidades que excedan en 1/32 Pulg. (1mm), pero menores ó igual a 1/8 Pulg. (3mm)
- c) 1/4 Pulg. (6mm) - la máxima dimensión de la grieta en el borde, excepto cuando dicha grieta sea el resultado de una visible inclusión de escoria u otros tipos de discontinuidades por fusión, entonces solo se permite 1/8 Pulg. (3mm) como máximo. Los resultados de las probetas se muestran en la tabla 31.

Tabla 31*Resultado de las pruebas de doblado*

Electrodo	Intensidad de corriente (Amperios)		Discontinuidad	Observación
E-316L-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
E 309L-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
E 312-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
E 308L-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado

3.8.3 Ensayo de Dureza (HB)

En la tabla 32, se detallan los valores del ensayo de dureza. Debe tenerse en cuenta que la dureza del material entregable tiene un valor de 170 HB.

Tabla 32*Dureza del depósito de soldadura, de la ZAC y del material base*

Electrodo	Intensidad de corriente (Amperios)	Metal base (HB)	ZAC (HB)	Deposito (HB)	ZAC (HB)	Metal base (HB)
E-316L-16	80	170	180	170	181	170
	95	170	169	170	170	170
	115	170	160	170	160	170
E 309L-16	80	170	184	185	184	170
	95	170	175	182	176	170
	115	170	160	185	162	170
E 312-16	80	170	180	240	180	170
	95	170	173	230	172	170
	115	170	160	220	162	170
E 308L-16	80	170	180	170	180	170
	95	170	170	170	170	170
	115	170	160	172	160	170

3.9 Resultados obtenidos y su discusión

3.9.1 Incremento de la Intensidad de Corriente

Tabla 33*Incremento de la intensidad de corriente*

Probeta	Electrodo	Intensidad de corriente (A)	Tensión eléctrica (V)	Veloc. De soldeo (mm/seg)	Calor neto aportado (j/mm)
1	E-308L-16	80	21	3.4	370.60
2	E-308L-16	95	22	3.9	401.90
3	E-308L-16	115	23	4.3	461.38
1	E-312-16	80	21	3.4	370.60
2	E-312-16	95	22	3.9	401.90
3	E-312-16	115	23	4.3	461.38
1	E-309L-16	80	21	3.4	370.60
2	E-309L-16	95	22	3.9	401.90
3	E-309L-16	115	23	4.3	461.38
1	E-316L-16	80	21	3.4	370.60
2	E-316L-16	95	22	3.9	401.90
3	E-316L-16	115	23	4.3	461.38

De acuerdo a los resultados de la tabla 33 se deduce que:

El aumento del amperaje en la soldadura incrementa el calor aportado, profundiza la penetración, permite mayor velocidad de soldeo, pero aumenta el riesgo de defectos como socavaciones y distorsiones, además de tener un ancho mayor de la ZAC y alterar la microestructura del acero ASTM A516 grado 70.

3.9.2 Inspección Visual de las Probetas Soldadas

Esta inspección visual se realizó de acuerdo a la norma ANSI/AWS D1.1.2000 (Esta norma se muestra en el anexo.....), los resultados se muestran en la tabla 34.

Tabla 34

Resultados de la inspección visual

Electrodo	Intensidad de corriente (Amperios)		Discontinuidad	Observación
E-316L-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
E 309L-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
E 312-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
E 308L-16	80	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	95	Cara	Ninguna	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado
	115	Cara	Socavaciones	Aceptado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aceptado

En base a los resultados mostrados en la tabla, la interpretación es la siguiente:

- A bajas corrientes (80 A y 95 A), todos los electrodos presentan falta de penetración en la raíz sin discontinuidades en la cara; a 115 A, se generan socavaciones en la cara del cordón debido al exceso de calor.
- A pesar de la presencia de discontinuidades, todas las soldaduras fueron aprobadas, lo que puede indicar que las discontinuidades identificadas no sobrepasan los criterios de aceptación establecidos en el procedimiento de soldadura de la norma ANSI/AWS D1.1-2000.

3.9.3 Prueba de Doblado

El objetivo de la prueba de doblado en juntas soldadas es evaluar la ductilidad y la calidad de la unión soldada, así como la integridad del metal de soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC). Esta prueba permite detectar defectos internos o superficiales, como grietas, porosidad, falta de fusión o falta de penetración, al someter la muestra a esfuerzos de flexión controlados. En la tabla 35, se muestra el resultado de la prueba de doblado.

Tabla 35*Resultados de la prueba de doblado*

Electrodo	Intensidad de corriente (Amperios)		Discontinuidad	Observación
E-316L-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
E 309L-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
E 312-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
E 308L-16	80	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	95	Cara	Ninguna	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado
	115	Cara	Socavaciones	Aprobado
		Raíz	Falta de penetración al inicio del cordón	Aprobado

Se evaluaron cuatro tipos de electrodos (E-316L-16, E-309L-16, E-312-16 y E-308L-16) aplicando tres niveles de intensidad de corriente (80 A, 95 A y 115 A) en la cara y la raíz del cordón de soldadura. En general, las observaciones muestran un patrón similar para todos los electrodos, destacándose dos tipos de discontinuidades: falta de penetración al inicio del cordón en la raíz y socavaciones en la cara del cordón a intensidades más altas.

En todos los casos, las soldaduras son aprobadas, lo que sugiere que las discontinuidades identificadas están dentro de los límites aceptables establecidos por la norma ANSI/AWS D1.1-2000.

3.9.4 Ensayo de Dureza

Los resultados se muestran en la tabla 36.

Tabla 36

Resultados de la prueba de doblado

Electrodo	Intensidad de corriente (Amperios)	Metal base (HB)	ZAC (HB)	Deposito (HB)	ZAC (HB)	Metal base (HB)
E-316L-16	80	170	180	170	181	170
	95	170	169	170	170	170
	115	170	160	170	160	170
E 309L-16	80	170	184	185	184	170
	95	170	175	182	176	170
	115	170	160	185	162	170
E 312-16	80	170	180	240	180	170
	95	170	173	230	172	170
	115	170	160	220	162	170
E 308L-16	80	170	180	170	180	170
	95	170	170	170	170	170
	115	170	160	172	160	170

En esta tabla 36, se presentan los valores de dureza Brinell (HB) medidos en el metal base, la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y el depósito de soldadura para los cuatro tipos de electrodos (E-316L-16, E-309L-16, E-312-16 y E-308L-16) a tres niveles de corriente (80 A, 95 A y 115 A). La dureza del metal en forma de entregable tiene una dureza de 170 HB. La dureza se explica por cada uno de los electrodos, así tenemos para:

1. Electrodo E-316L-16:

80 A:

- La dureza en la ZAC es de 180 HB, esto indica un ligero endurecimiento en comparación con el metal base. El depósito de soldadura mantiene la dureza del metal base (170 HB), lo que es típico en este electrodo a baja corriente.

95 A:

- La dureza en la ZAC desciende a 169 HB, prácticamente igual al metal base, implica que no se produjeron cambios significativos en la microestructura.

115 A:

- Se observa una disminución en la dureza de la ZAC a 160 HB, esto implica que hubo un posible sobrecalentamiento que podría haber generado un crecimiento de grano o un alivio de tensiones.

En concreto podemos decir que a medida que aumenta la corriente, la dureza de la ZAC disminuye, indicando un posible ablandamiento térmico a 115 A.

2. Electrodo E-309L-16:**80 A:**

- Se presenta un endurecimiento en la ZAC (184 HB) y en el depósito (185 HB), lo que indica una mayor resistencia al desgaste.

95 A:

- La dureza disminuye ligeramente en la ZAC (175 HB) y se mantiene elevada en el depósito (182 HB).

115 A:

- Disminuye la dureza en la ZAC (160 HB) mientras que el depósito mantiene una dureza alta (185 HB), lo que implica que el material de aporte retiene su dureza a mayor intensidad de corriente.

Concluyendo se puede afirmar que este electrodo muestra un comportamiento más resistente en el depósito que en la ZAC, especialmente a intensidades de corriente elevadas.

3. Electrodo E-312-16:

80 A:

- La dureza del depósito alcanza un valor elevado de 240 HB, indicando un material de aporte considerablemente más duro que el metal base. La ZAC presenta también un ligero endurecimiento (180 HB).

95 A:

- La dureza del depósito sigue siendo alta (230 HB), con una ligera disminución en la ZAC (173 HB).

115 A:

- Se observa un descenso en la dureza de la ZAC (160 HB), mientras que el depósito sigue presentando una dureza alta (220 HB).

Se puede afirmar que el electrodo E-312-16 es el electrodo que genera mayor dureza en el depósito, lo que es beneficioso para aplicaciones donde se requiere alta resistencia al desgaste.

4. Electrodo E-308L-16:

80 A:

- La dureza en la ZAC aumenta ligeramente (180 HB), pero el depósito mantiene la dureza del metal base (170 HB).

95 A:

- No se observan variaciones significativas; las durezas son similares al metal base.

115 A:

- La ZAC muestra una disminución en la dureza (160 HB), mientras que el depósito aumenta ligeramente a 172 HB.

Este electrodo mantiene las características del metal base, siendo el que menos altera la dureza general de la unión soldada.

CONCLUSIONES

Primera. La selección del material de aporte tuvo una influencia significativa en las propiedades mecánicas del recubrimiento aplicado sobre acero ASTM A516 Grado 70 mediante el proceso SMAW. En particular, se observó una variación de dureza del depósito entre 170 HB y 240 HB, dependiendo del electrodo y la intensidad de corriente. El electrodo E-312-16 generó un depósito con la mayor dureza promedio (230 HB), mientras que los electrodos E-308L-16 y E-316L-16 mantuvieron durezas similares al metal base (170–172 HB), mostrando mayor compatibilidad estructural.

Segunda. La composición química del material de aporte afectó directamente la resistencia a la corrosión y la adhesión del recubrimiento al sustrato. Electrodo con alto contenido de Ni ($\approx 10.0\text{--}10.7\%$) y Mo ($\approx 1.86\text{--}2.02\%$), como E-309L-16 y E-312-16, mejoraron la resistencia a la corrosión, pero incrementaron la dureza del recubrimiento en un 30–40% respecto al metal base. En contraste, los electrodos E-308L-16 y E-316L-16, con composiciones más equilibradas y durezas menores (172 HB y 170 HB, respectivamente), favorecieron la homogeneidad del depósito y una mejor adhesión.

Tercera. La dureza del recubrimiento varió en función de la corriente aplicada y del tipo de electrodo:

- E-312-16 alcanzó la mayor dureza en el depósito:
 - 240 HB (80 A),
 - 230 HB (95 A),

- 220 HB (115 A).

Esta tendencia mostró una disminución de ~8% con el aumento de la corriente, aunque el valor se mantuvo muy por encima del metal base.

- E-308L-16 y E-316L-16 presentaron una dureza del depósito casi constante (170–172 HB) y cercana al metal base (170 HB), lo que sugiere alta compatibilidad estructural y menor concentración de tensiones internas.
- En la zona afectada por el calor (ZAC), se observó un descenso de dureza del 10–12% a 115 A en la mayoría de los electrodos, lo que se asocia a posibles fenómenos de sobrecalentamiento y crecimiento de grano.

Cuarta. La integridad mecánica del recubrimiento también estuvo condicionada por el tipo de electrodo y la intensidad de corriente:

- A 80 A y 95 A, todos los electrodos presentaron falta de fusión y penetración, asociadas a una energía de aporte insuficiente.
- A 115 A, los electrodos E-309L-16 y E-312-16 mostraron socavaciones y microdefectos estructurales debido a su alta fluidez, mientras que E-308L-16 y E-316L-16 conservaron una estructura más uniforme y con menor incidencia de defectos.

Se concluye que los electrodos con contenido de Cr y Ni superior al 10% ofrecen mayor dureza y resistencia a la corrosión, pero requieren mayor control térmico para evitar defectos metalúrgicos.

RECOMENDACIONES

Primera. Se recomienda realizar un estudio microestructural del depósito de soldadura y la ZAC.

Segunda. Se recomienda utilizar equipos más sofisticados para tener resultados más exactos

REFERENCIAS

- A.Garcia, A. J. (2010). Estudio tribologico de aceros austeniticos tipo hadfield, influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Metalurgia*, 46, 47-52. https://www.academia.edu/11560942/Estudio_tribol%C3%B3gico_de_aceros_austen%C3%ADticos_tipo_Hadfield_influencia_del_manganeso_en_su_respuesta_frente_al_desgaste
- Alonso, C. (2012). *Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto*. Cano Pina Ceysa.
- Alvarado Moreno, A. (2019). *Evaluación de la formación de carburos, en un material astm a 516 grado 70, afectado por un proceso de soldadura fcaw y temperaturas superiores a 427 °*. C. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Boyacá. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/8537>
- American Welding Society. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.
- ANSI/AWS D.1.1. (2000). *Código para soldadura estructural acero*. studocu: <https://www.studocu.com/pe/document/servicio-nacional-de-adiestramiento-en-trabajo-industrial/electricidad-industrial-senati/ansi-aws-d11-2000-soldadura-estructural/107911659>
- ASM Handbook. (1994). *Manual ASM Volumen 5: Ingeniería de superficies* (Vol. vol. 05). New York: ASM, Surface Engineering,. <https://www.asminternational.org/wp-content/uploads/files/06125G/06125G-toc.pdf>
- ASTM A516. (2015). *Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service*. Advancing standars transforming markets: https://store.astm.org/a0516_a0516m-10r15.html
- Ayala Alamoto, E. D., & Pucha Severino, O. M. (2016). *Análisis fractográfico del recubrimiento metálico overlay depositado mediante proceso SMAW en acero AISI 4130 y evaluado según código asme sección IX*. Quito : EPN. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- Fosca, C. (2007). Introduccion a la metalurgia de la soldadura. *Introduccion a la metalurgia de la soldadura*. PUCP, Lima, Peru. <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadaura-Carlos-Fosca-pdf>
- Gualco, A. (2011). *Efecto de los parámetros de soldadura sobre la microestructura y la resistencia al desgaste de recargues martensíticos depositados con alambres tubulares metal-cored*.

- Tesis de posgrado, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
<https://repositorio.unlz.edu.ar/handle/123456789/150?locale-attribute=pt>
- Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). *Coatings Tribology Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. Brian Briscoe (UK).
https://users.encs.concordia.ca/~tmg/images/6/64/Coatings_Tribology.pdf
- Jeffus, L. (2009). *Soldadura, principios y aplicaciones* (5ta Edición ed.). España: Paraninfo.
 scribd: <https://es.scribd.com/document/360256860/SOLDADURA-PRINCIPIOS-Y-APLICACIONES-5ED-LARRY-JEFFUS-pdf>
- Lincoln Electric. (2013). *Soldeo manual con electrodos revestidos*. Lincoln Electric.
https://www.academia.edu/7303830/Manual_Lincol_Electrodos
- Mamani Llacma , Y. P. (2018). *Fabricacion y montaje de tanques de lixiviacion 20'x20' en la planta de beneficio ishihuinca por la empresa FAMICO S.A.C.* Arequipa.
- Marcos, C. A. (2015). *Manual de prácticas de soldadura*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Cornejo Cutimbo, K. A. (2023). *Influencia de la soldadura multipasadas en la dureza del acero ASTM 128 por el proceso SMAW (Investigación Tecnológica)*.
- Atayupanqui Zarate, A., & Montalvo Serrano, d. G. (2024). *Selección de material de aporte para recargue (Overlay) del acero ASTM A285-B por el proceso SMAW (Investigación Tecnológica)*.
- Oerlikon. (2008). *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos*. Lima: Exsa.
<https://www.soldaceros.com.pe/wp-content/uploads/2015/09/Manual-de-Soldadura-OERLIKON.pdf>
- OERLIKON. (2010). *Conceptos generales de soldadura y procesos*. <https://32f8a4474e.cbaul-cdnwnd.com/b73e82edc150aa5a937ca7e4d84ae8dc/200000007-b005db0ff9/manual%20de%20soldadura.pdf>
- Soldexa. (2011). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos*. Oerlikon.
<https://es.slideshare.net/RonPincu/manual-soldadura-soldexa-15139801>

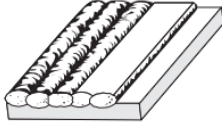
ANEXOS

Anexo 1

a) AWS E308L-16

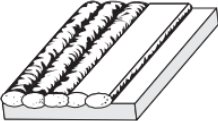
Probeta 1

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS	
Institución:						Identificación N°:		Probeta 1	
Proceso de soldadura:		SMAW				Soporte PQR N°:		PQR – 01	
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:					Ranura:		Filete:		
Tipo de soldadura:			Recubrimiento (overlay)		Plancha:		1G		Tubería:
Abertura de raíz:					Características eléctricas				
Talón altura de raíz o talón:									
Angulo de ranura:									
Soporte:			No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:			E-308L-16		DC:				
Limpieza de la raíz:					AC:		ACEP		X
Metal base					Técnica				
Datos		M.B.1				Aportación		Oscilación	Recta X
Grupo:		1				Pase:		Múltiple	Simple X
Especificación		ASTM A516				Limpieza en pases		Disco abrasivo.	
Grado:		70				Precalentamiento			
Espesor:		4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)			159
Diámetro:						Temperatura interpase:			--
					Postcalentamiento				
						Temperatura: -----		Tiempo:	-----
Metal de aporte					Protección				
Especificación:		A5.5				Fundente:		--	Gas: ---
Calificación AWS:		A5.5				Composición		--	Composición ---
Marca:		0erlikon				Vel. Flujo			
Tamaño de alambre:		-----							
Procedimiento de soldadura									

N.º de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. desplazamiento. (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	80	20	3.4
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:		Henry Merma		Fecha:		12/01/2025	
Revisado por:		Mgt. Ing.		Institución:		UNSAAC	

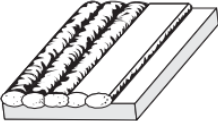
Probeta 2

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA.											
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA											
Especificación del procedimiento de soldadura										WPS	
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1					
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:	PQR – 01					
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:			Maquina:	Miller-XMT 304 CC		
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:					
Diseño de la junta.					Posición						
Tipo de junta:					Ranura:			Filete:			
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (overlay)			Plancha:	1G		Tubería:			
Abertura de raíz:					Características eléctricas						
Talón altura de raíz o talón:											
Angulo de ranura:											
Soporte:					No						
Material de aporte:					E-308L-16						
Limpieza de la raíz:					DC:				ACEP		X
Metal base					Técnica						
Datos	M.B.1				Aportación		Oscilación		Recta		X
Grupo:	1				Pase:		Múltiple		Simple		X
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases		Disco abrasivo.				
Grado:	70				Precalentamiento						
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)						159
Diámetro:					Temperatura interpase:						--
					Postcalentamiento						
				Temperatura:		-----		Tiempo:		-----	
Metal de aporte					Protección						
Especificación:		A5.5			Fundente:		--		Gas:		---
Calificación AWS:		A5.5			Composición		--		Composición		---
Marca:		0erlikon							Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:		-----									
Procedimiento de soldadura											
Proceso		Material de aporte			Corriente		Voltaje (v)				

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	95	22	3.9
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry Merma		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

Probeta 3

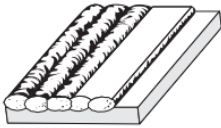
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA											
Especificación del procedimiento de soldadura											WPS
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1					
Proceso de soldadura:	SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01					
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC			
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:					
Diseño de la junta.					Posición						
Tipo de junta:					Ranura:						
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (overlay)			Plancha:		1G		Filete:		
Abertura de raíz:					Características eléctricas						
Talón altura de raíz o talón:											
Angulo de ranura:											
Soporte:		No			Corriente: proceso SMAW						
Material de aporte:		E-308L-16			DC:						
Limpieza de la raíz:					AC:		ACEP		X		
Metal base					Técnica						
Datos	M.B.1				Aportación		Oscilación		Recta		X
Grupo:	1				Pase:		Múltiple		Simple		X
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases		Disco abrasivo.				
Grado:	70				Precalentamiento						
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento(°C)						159
Diámetro:					Temperatura interpase:						--
					Postcalentamiento						
						Temperatura:		-----		Tiempo: -----	
Metal de aporte					Protección						
Especificación:		A5.5			Fundente:		--		Gas:		---
Calificación AWS:		A5.5			Composición		--		Composición		---
Marca:		Oerlikon							Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:		-----									
Procedimiento de soldadura											
Proceso		Material de aporte			Corriente			Voltaje (v)			

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	115	23	4.3
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry Merma		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

b) AWS E312-16

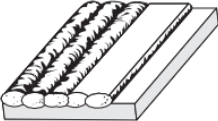
Probeta 1

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS	
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1			
Proceso de soldadura:	SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01			
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:					Ranura:			Filete:	
Tipo de soldadura:			Recubrimiento (overlay)		Plancha:	1G		Tubería:	
Abertura de raíz:					Características eléctricas				
Talón altura de raíz o talón:									
Angulo de ranura:									
Soporte:			No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:			E-312-16		DC:				
Limpieza de la raíz:					AC:	ACEP		X	
Metal base					Técnica				
Datos	M.B.1				Aportación	Oscilación		Recta	X
Grupo:	1				Pase:	Múltiple		Simple	X
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases	Disco abrasivo.			
Grado:	70				Precalentamiento				
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)				159
Diámetro:					Temperatura interpase:				--
					Postcalentamiento				
					Temperatura:	-----	Tiempo:	-----	
Metal de aporte					Protección				
Especificación:	A5.5				Fundente:	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5				Composición	--	Composición	---	
Marca:	Oerlikon						Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----								
Procedimiento de soldadura									

N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo e Polaridad	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	80	20	3.4
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:		Henry Merma		Fecha:		12/01/2025	
Revisado por:		Mgt. Ing.		Institución:		UNSAAC	

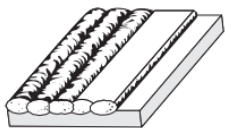
Probeta 2

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA																				
Especificación del procedimiento de soldadura										WPS										
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1														
Proceso de soldadura:		SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01													
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:		Miller-XMT 304 CC											
Revisión:	00	Fecha:		12 /01/2025		Revisado por:														
Diseño de la junta.					Posición															
Tipo de junta:					Ranura:			Filete:												
Tipo de soldadura:			Recubrimiento (overlay)		Plancha:	1G		Tubería:												
Abertura de raíz:					Características eléctricas															
Talón altura de raíz o talón:																				
Angulo de ranura:																				
Soporte:					No															
Material de aporte:					Corriente: proceso SMAW															
Limpieza de la raíz:					DC:															
					AC:		ACEP		X											
Metal base					Técnica															
Datos	M.B.1				Aportación		Oscilación			Recta	X									
Grupo:	1				Pase:		Múltiple			Simple	X									
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases		Disco abrasivo.													
Grado:	70				Precalentamiento															
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento(°C)					159										
Diámetro:					Temperatura interpase:					--										
					Postcalentamiento															
					Temperatura:	-----		Tiempo:	-----											
Metal de aporte					Protección															
Especificación:			A5.5		Fundente:		--	Gas:	---											
Calificación AWS:			A5.5		Composición		--	Composición	---											
Marca:			0erlikon					Vel. Flujo												
Tamaño de alambre:			-----																	
Procedimiento de soldadura																				
		Proceso	Material de aporte		Corriente			Voltaje (v)												

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	95	22	3.9
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry Merma		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

Probeta 3

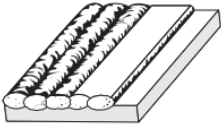
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA											
Especificación del procedimiento de soldadura											WPS
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1					
Proceso de soldadura:	SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01					
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC			
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:					
Diseño de la junta.					Posición						
Tipo de junta:					Ranura:						
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (overlay)			Plancha:		1G		Filete:		
Abertura de raíz:					Características eléctricas						
Talón altura de raíz o talón:											
Angulo de ranura:											
Soporte:		No			Corriente: proceso SMAW						
Material de aporte:		E-312-16			DC:						
Limpieza de la raíz:					AC:		ACEP		X		
Metal base					Técnica						
Datos	M.B.1			Aportación		Oscilación		Recta		X	
Grupo:	1			Pase:		Múltiple		Simple		X	
Especificación	ASTM A516			Limpieza en pases		Disco abrasivo.					
Grado:	70			Precalentamiento							
Espesor:	4.725 mm			Temperatura de precalentamiento (°C)						159	
Diámetro:				Temperatura interfase:						--	
					Postcalentamiento						
					Temperatura:		-----		Tiempo:		----
Metal de aporte					Protección						
Especificación:		A5.5			Fundente:		--		Gas:		---
Calificación AWS:		A5.5			Composición		--		Composición		---
Marca:		0erlikon							Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:		-----									
Procedimiento de soldadura											
Proceso		Material de aporte			Corriente			Voltaje (v)			

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	115	23	4.3
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry Merma		Fecha.	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

c) AWS E309L-16

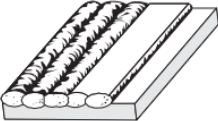
Probeta 1

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA											
Especificación del procedimiento de soldadura										WPS	
Institución:						Identificación N°:		Probeta 1			
Proceso de soldadura:			SMAW			Soporte PQR N°:		PQR – 01			
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:	Maquina:			Miller-XMT 304 CC		
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:					
Diseño de la junta.					Posición						
Tipo de junta:						Ranura:		Filete:			
Tipo de soldadura:			Recubrimiento (overlay)			Plancha:		1G		Tubería:	
Abertura de raíz:					Características eléctricas						
Talón altura de raíz o talón:											
Angulo de ranura:											
Soporte:			No			Corriente: proceso SMAW					
Material de aporte:			E-309L-16			DC:					
Limpieza de la raíz:						AC:		ACEP		X	
Metal base					Técnica						
Datos		M.B.1				Aportación		Oscilación		Recta X	
Grupo:		1				Pase:		Múltiple		Simple X	
Especificación		ASTM A516				Limpieza en pases		Disco abrasivo.			
Grado:		70				Precalentamiento					
Espesor:		4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)					159
Diámetro:						Temperatura interpase:					--
					Postcalentamiento						
						Temperatura:		-----		Tiempo: -----	
Metal de aporte					Protección						
Especificación:			A5.5			Fundente:		--		Gas: ---	
Calificación AWS:			A5.5			Composición:		--		Composición ---	
Marca:			Oerlikon							Vel. Flujo	
Tamaño de alambre:			-----								
Procedimiento de soldadura											
Proceso		Material de aporte			Corriente			Voltaje (v)			

N.º de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	80	20	4.3
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry Merma		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

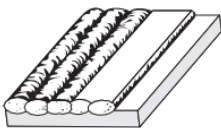
Probeta 2

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS	
Institución:					Identificación N°:		Probeta 1		
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:		PQR – 01		
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:					Ranura:		Filete:		
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (overlay)			Plancha:		1G		Tubería:
Abertura de raíz:					Características eléctricas				
Talón altura de raíz o talón:									
Angulo de ranura:									
Soporte:		No			Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:		E-309L-16			DC:				
Limpieza de la raíz:					AC:		ACEP		X
Metal base					Técnica				
Datos	M.B.1				Aportación		Oscilación	Recta	X
Grupo:	1				Pase:		Múltiple	Simple	
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases		Disco abrasivo.		
Grado:	70				Precalentamiento				
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)				159
Diámetro:					Temperatura interpase:				--
					Postcalentamiento				
				Temperatura:		-----	Tiempo:	----	
Metal de aporte					Protección				
Especificación:		A5.5			Fundente:		--	Gas:	---
Calificación AWS:		A5.5			Composición		--	Composición	---
Marca:		Oerlikon					Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:		-----							
Procedimiento de soldadura									
Proceso		Material de aporte			Corriente		Voltaje (v)		

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	95	22	3.9
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry Merma		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

Probeta 3

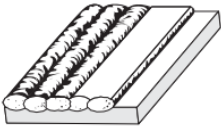
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA														
Especificación del procedimiento de soldadura										WPS				
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1								
Proceso de soldadura:	SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01								
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC						
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:								
Diseño de la junta.					Posición									
Tipo de junta:					Ranura:		Filete:							
Tipo de soldadura:					Recubrimiento (overlay)		Plancha:		1G		Tubería:			
Abertura de raíz:					Características eléctricas									
Talón altura de raíz o talón:														
Angulo de ranura:														
Soporte:					No		Corriente: proceso SMAW							
Material de aporte:					E-309L-16		DC:							
Limpieza de la raíz:							AC:		ACEP		X			
Metal base					Técnica									
Datos	M.B.1				Aportación		Oscilación		Recta		X			
Grupo:	1				Pase:		Múltiple		Simple		X			
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases		Disco abrasivo.							
Grado:	70				Precalentamiento									
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)						159			
Diámetro:					Temperatura interpase:						--			
					Postcalentamiento									
					Temperatura:		-----		Tiempo:		-----			
Metal de aporte					Protección									
Especificación:					A5.5		Fundente:		--		Gas:		---	
Calificación AWS:					A5.5		Composición		--		Composición		---	
Marca:					Oerlikon						Vel. Flujo			
Tamaño de alambre:					-----									
Procedimiento de soldadura														
Proceso		Material de aporte			Corriente			Voltaje (v)						

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	115	23	3.4
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry O. Merma León		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

d) AWS E316L-16

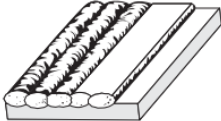
Probeta 1

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS	
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1			
Proceso de soldadura:		SMAW			Soporte PQR N°:	PQR – 01			
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:					Ranura:			Filete:	
Tipo de soldadura:		Recubrimiento (overlay)			Plancha:	1G		Tubería:	
Abertura de raíz:					Características eléctricas				
Talón altura de raíz o talón:									
Angulo de ranura:									
Soporte:		No			Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:		E-316L-16			DC:				
Limpieza de la raíz:					AC:			ACEP	X
Metal base					Técnica				
Datos	M.B.1				Aportación	Oscilación		Recta	X
Grupo:	1				Pase:	Múltiple		Simple	X
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases	Disco abrasivo.			
Grado:	70				Precalentamiento				
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)				159
Diámetro:					Temperatura interpase:				--
					Postcalentamiento				
				Temperatura:	-----		Tiempo:	-----	
Metal de aporte					Protección				
Especificación:	A5.5				Fundente:	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5				Composición	--	Composición	---	
Marca:	Oerlikon						Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----								
Procedimiento de soldadura									

N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo e Polaridad	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	80	20	3.4
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:		Henry O. Merma León		Fecha.		12/01/2025	
Revisado por:		Mgt. Ing.		Institución:		UNSAAC	

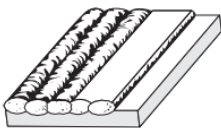
Probeta 2

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA.									
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS	
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1			
Proceso de soldadura:	SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01			
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:					Ranura:			Filete:	
Tipo de soldadura:			Recubrimiento (overlay)		Plancha:	1G		Tubería:	
Abertura de raíz:					Características eléctricas				
Talón altura de raíz o talón:									
Angulo de ranura:									
Soporte:					No				
Material de aporte:					E-316L-16				
Limpieza de la raíz:					AC:				
					ACEP				
					X				
Metal base					Técnica				
XDatos	M.B.1				Aportación	Oscilación		Recta	X
Grupo:	1				Pase:	Múltiple		Simple	X
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases	Disco abrasivo.			
Grado:	70				Precalentamiento				
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)				159
Diámetro:					Temperatura interpase:				--
					Postcalentamiento				
					Temperatura:	-----	Tiempo:	-----	
Metal de aporte					Protección				
Especificación:	A5.5				Fundente:	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5				Composición	--	Composición	---	
Marca:	Oerlikon						Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----								
Procedimiento de soldadura									
	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)			

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	95	22	3.9
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry O. Merma León		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

Probeta 3

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA. ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS	
Institución:					Identificación N°:	Probeta 1			
Proceso de soldadura:	SMAW				Soporte PQR N°:	PQR – 01			
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:					Ranura:			Filete:	
Tipo de soldadura:			Recubrimiento (overlay)		Plancha:	1G		Tubería:	
Abertura de raíz:					Características eléctricas				
Talón altura de raíz o talón:									
Angulo de ranura:									
Soporte:			No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:			E-316L-16		DC:				
Limpieza de la raíz:					AC:	ACEP		X	
Metal base					Técnica				
Datos	M.B.1				Aportación	Oscilación		Recta	X
Grupo:	1				Pase:	Múltiple		Simple	X
Especificación	ASTM A516				Limpieza en pases	Disco abrasivo.			
Grado:	70				Precalentamiento				
Espesor:	4.725 mm				Temperatura de precalentamiento (°C)				159
Diámetro:					Temperatura interfase:				--
					Postcalentamiento				
					Temperatura:	-----		Tiempo:	-----
Metal de aporte					Protección				
Especificación:	A5.5				Fundente:	--	Gas:	---	
Calificación AWS:	A5.5				Composición	--	Composición	---	
Marca:	Oerlikon						Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:	-----								
Procedimiento de soldadura									
	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)			

N.- de pases		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		Vel. De desplazamiento. (mm/seg)
1	SMAW	E-308L-16	1/8"	AC+	115	23	4.3
Detalles de la junta soldada							
							
Elaborado por:	Henry O. Merma León		Fecha:	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Ing.		Institución:	UNSAAC			

Anexo 2

Operaciones realizadas para cálculo del calor neto aportado

▪ Electrodo E308L-16

- Probeta 1

$$H_{net} = \frac{80 \times 21}{3.4} \times 0.75 = 370.60 \text{ J/mm}$$

- Probeta 2:

$$H_{net} = \frac{95 \times 22}{3.90} \times 0.75 = 401.90 \frac{J}{mm}$$

- Probeta 3:

$$H_{net} = \frac{115 \times 23}{4.3} \times 0.75 = 461.38 \text{ J/mm}$$

• Electrodo E-312-16

- Probeta 1

$$H_{net} = \frac{80 \times 21}{3.4} \times 0.75 = 370.60 \text{ J/mm}$$

- Probeta 2

$$H_{net} = \frac{95 \times 22}{3.9} \times 0.75 = 401.90 \frac{J}{mm}$$

- Probeta 3

$$H_{net} = \frac{115 \times 23}{4.3} \times 0.75 = 461.38 \text{ J/mm}$$

- **Electrodo E-309L-16**

- Probeta 1

$$H_{net} = \frac{80 \times 21}{3.4} \times 0.75 = 370.60 \text{ J/mm}$$

- Probeta 2

$$H_{net} = \frac{95 \times 22}{3.9} \times 0.75 = 401.90 \frac{\text{J}}{\text{mm}}$$

- Probeta 3

$$H_{net} = \frac{115 \times 23}{4.3} \times 0.75 = 461.38 \text{ J/mm}$$

- **Electrodo E-316L-16**

- Probeta 1

$$H_{net} = \frac{80 \times 21}{3.4} \times 0.75 = 370.60 \text{ J/mm}$$

- Probeta 2

$$H_{net} = \frac{95 \times 22}{3.9} \times 0.75 = 401.90 \frac{\text{J}}{\text{mm}} \text{ Calor neto aportado}$$

- Probeta 3

$$H_{net} = \frac{115 \times 23}{4.3} \times 0.75 = 461.38 \text{ J/mm}$$

Anexo 3

Cálculo de las composiciones químicas de los depósitos con diferentes electrodos.

- **Para electrodo E-316L-16**

- **Probeta 1 (80 Amperios)**

$$\%C = 0.2570 (0.31) + (1-0.2570) (0.03) = 0.101$$

$$\% Mn = 0.2570 (1.20) + (1-0.2570) (0.8) = 0.90$$

$$\% Si = 0.2570 (0.275) + (1-0.2570) (0.70) = 0.577$$

$$\%S = 0.2570(0.035) + (1-0.2570) (0.020) = 0.024$$

$$\%P = 0.2570(0.035) + (1-0.2570) (0.025) = 0.028$$

$$\%Cu = 0.2570(0.020) + (1-0.2570) (0.0185) = 0.019$$

$$\%Ni = 0.2570(0) + (1-0.2570) (13) = 9.66$$

$$\%Mo = 0.2570(0) + (1-0.2570) (2.5) = 1.86$$

- **Probeta 2 (95 Amperios)**

$$\%C = 0.20 (0.31) + (1-0.20) (0.03) = 0.086$$

$$\% Mn = 0.20 (1.20) + (1-0.20) (0.8) = 0.88$$

$$\% Si = 0.20 (0.275) + (1-0.20) (0.70) = 0.62$$

$$\%S = 0.20(0.035) + (1-0.20) (0.020) = 0.023$$

$$\%P = 0.20(0.035) + (1-0.20) (0.025) = 0.027$$

$$\%Cu = 0.20(0.020) + (1-0.20) (0.0185) = 0.019$$

$$\%Ni = 0.20(0) + (1-0.20) (13) = 10.4$$

$$\%Mo = 0.20(0) + (1-0.20) (2.5) = 2.0$$

- **Probeta 3 (115 Amperios)**

$$\%C = 0.22 (0.31) + (1-0.22) (0.03) = 0.086$$

$$\%Mn = 0.22 (1.20) + (1-0.22) (0.8) = 0.88$$

$$\%Si = 0.22 (0.275) + (1-0.22) (0.70) = 0.62$$

$$\%S = 0.22 (0.031) + (1-0.22) (0.03) = 0.03$$

$$\%P = 0.22 (0.035) + (1-0.22) (0.025) = 0.027$$

$$\%Cu = 0.22 (0.020) + (1-0.22) (0.0185) = 0.019$$

$$\%Ni = 0.22 (0) + (1-0.22) (13) = 10.5$$

$$\%Mo = 0.22 (0) + (1-0.22) (2.5) = 2.02$$

Para electrodo E 309L-16

- **Probeta 1 (80 Amperios)**

$$\%C = 0.1927 (0.31) + (1-0.1927) (0.03) = 0.084$$

$$\%Mn = 0.1927 (1.20) + (1-0.1927) (0.8) = 0.88$$

$$\%Si = 0.1927 (0.275) + (1-0.1927) (0.70) = 0.62$$

$$\%S = 0.1927 (0.035) + (1-0.1927) (0.020) = 0.023$$

$$\%P = 0.1927 (0.035) + (1-0.1927) (0.025) = 0.027$$

$$\%Cu = 0.1927 (0.020) + (1-0.1927) (0.0185) = 0.019$$

$$\%Ni = 0.1927 (0) + (1-0.1927) (13) = 10.50$$

$$\%Mo = 0.1927 (0) + (1-0.1927) (2.5) = 2.02$$

- **Probeta 2 (95 Amperios)**

$$\%C = 0.2017 (0.31) + (1-0.2017) (0.03) = 0.086$$

$$\%Mn = 0.2017 (1.20) + (1-0.2017) (0.8) = 0.88$$

$$\%Si = 0.2017 (0.275) + (1-0.2017) (0.70) = 0.61$$

$$\%S = 0.2017 (0.035) + (1-0.2017) (0.020) = 0.023$$

$$\%P = 0.2017 (0.035) + (1-0.2017) (0.025) = 0.027$$

$$\%Cu = 0.2017 (0.020) + (1-0.2017) (0.0185) = 0.019$$

$$\%Ni = 0.2017 (0) + (1-0.2017) (13) = 10.4$$

$$\%Mo = 0.2017 (0) + (1-0.2017) (2.5) = 2.0$$

- **Probeta 3(115 Amperios)**

- $\%C = 0.2130 (0.31) + (1-0.2130) (0.03) = 0.089$
- $\% Mn = 0.2130 (1.20) + (1-0.2130) (0.8) = 0.885$
- $\% Si = 0.2130 (0.275) + (1-0.2130) (0.70) = 0.61$
- $\%S = 0.2130 (0.035) + (1-0.2130) (0.020) = 0.023$
- $\%P = 0.2130 (0.035) + (1-0.2130) (0.025) = 0.027$
- $\%Cu = 0.2130 (0.020) + (1-0.2130) (0.0185) = 0.019$
- $\%Ni = 0.2130 (0) + (1-0.2130) (13) = 10.23$
- $\%Mo = 0.2130 (0) + (1-0.2130) (2.5) = 1.9675$

Para electrodo E 312-16

- **Probeta 1 (80 Amperios)**
 - $\%C = 0.1860 (0.31) + (1-0.1860) (0.03) = 0.082$
 - $\% Mn = 0.1860 (1.20) + (1-0.1860) (0.8) = 0.84$
 - $\% Si = 0.1860 (0.275) + (1-0.1860) (0.70) = 0.62$
 - $\%S = 0.1860 (0.035) + (1-0.1860) (0.020) = 0.023$
 - $\%P = 0.1860 (0.035) + (1-0.1860) (0.025) = 0.027$
 - $\%Cu = 0.1860 (0.020) + (1-0.1860) (0.0185) = 0.019$
 - $\%Ni = 0.1860 (0) + (1-0.1860) (13) = 10.58$
 - $\%Mo = 0.1860 (0) + (1-0.1860) (2.5) = 2,04$
- **Probeta 2 (95 Amperios)**
 - $\%C = 0.20 (0.31) + (1-0.20) (0.03) = 0.086$
 - $\% Mn = 0.20 (1.20) + (1-0.20) (0.8) = 0.88$
 - $\% Si = 0.20 (0.275) + (1-0.20) (0.70) = 0.62$
 - $\%S = 0.20(0.035) + (1-0.20) (0.020) = 0.023$
 - $\%P = 0.20(0.035) + (1-0.20) (0.025) = 0.027$
 - $\%Cu = 0.20(0.020) + (1-0.20) (0.0185) = 0.019$
 - $\%Ni = 0.20(0) + (1-0.20) (13) = 10.4$
 - $\%Mo = 0.20(0) + (1-0.20) (2.5) = 2.00$
- **Probeta 3 (115 Amperios)**
 - $\%C = 0.2295 (0.31) + (1-0.2295) (0.03) = 0.094$

- $\% \text{ Mn} = 0.2295 (1.20) + (1-0.2295) (0.8) = 0.89$
- $\% \text{ Si} = 0.2295 (0.275) + (1-0.2295) (0.70) = 0.60$
- $\% \text{ S} = 0.2295 (0.035) + (1-0.2295) (0.020) = 0.023$
- $\% \text{ P} = 0.2295 (0.035) + (1-0.2295) (0.025) = 0.027$
- $\% \text{ Cu} = 0.2295 (0.020) + (1-0.2295) (0.0185) = 0.019$
- $\% \text{ Ni} = 0.2295 (0) + (1-0.2295) (13) = 10.02$
- $\% \text{ Mo} = 0.2295 (0) + (1-0.2295) (2.5) = 1.93$

Para electrodo E 308L-16

- **Probeta 1 (80 Amperios)**
 - $\% \text{ C} = 0.20 (0.31) + (1-0.20) (0.03) = 0.086$
 - $\% \text{ Mn} = 0.20 (1.20) + (1-0.20) (0.8) = 0.88$
 - $\% \text{ Si} = 0.20 (0.275) + (1-0.20) (0.70) = 0.62$
 - $\% \text{ S} = 0.20(0.035) + (1-0.20) (0.020) = 0.023$
 - $\% \text{ P} = 0.20(0.035) + (1-0.20) (0.025) = 0.027$
 - $\% \text{ Cu} = 0.20(0.020) + (1-0.20) (0.0185) = 0.019$
 - $\% \text{ Ni} = 0.20(0) + (1-0.20) (13) = 10.4$
 - $\% \text{ Mo} = 0.20(0) + (1-0.20) (2.5) = 2.00$
- **Probeta 2 (95 Amperios)**
 - $\% \text{ C} = 0.2037 (0.31) + (1-0.2037) (0.03) = 0.087$
 - $\% \text{ Mn} = 0.2037 (1.20) + (1-0.2037) (0.8) = 0.88$
 - $\% \text{ Si} = 0.2037 (0.275) + (1-0.2037) (0.70) = 0.61$
 - $\% \text{ S} = 0.2037 (0.035) + (1-0.2037) (0.020) = 0.023$
 - $\% \text{ P} = 0.2037 (0.035) + (1-0.2037) (0.025) = 0.027$
 - $\% \text{ Cu} = 0.2037 (0.020) + (1-0.2037) (0.0185) = 0.019$
 - $\% \text{ Ni} = 0.2037 (0) + (1-0.2037) (13) = 10.35$
 - $\% \text{ Mo} = 0.2037 (0) + (1-0.2037) (2.5) = 1.99$
- **Probeta 3(115 Amperios)**
 - $\% \text{ C} = 0.2252 (0.31) + (1-0.2252) (0.03) = 0.093$
 - $\% \text{ Mn} = 0.2252 (1.20) + (1-0.2252) (0.8) = 0.89$

- % Si = $0.2252 (0.275) + (1-0.2252) (0.70) = 0.60$
- %S = $0.2252 (0.035) + (1-0.2252) (0.020) = 0.023$
- %P = $0.2252 (0.035) + (1-0.2252) (0.025) = 0.027$
- %Cu = $0.2252 (0.020) + (1-0.2252) (0.0185) = 0.019$
- %Ni = $0.2252 (0) + (1-0.2252) (13) = 10.72$
- %Mo = $0.2252 (0) + (1-0.2252) (2.5) = 1.97$

Anexo 4

NAZCA NOX 316L



Es un electrodo extra bajo en carbono del tipo 18Cr12Ni2,8Mo. Adecuado para el soldeo de aceros estabilizados de composición similar, excepto cuando ha de satisfacerse la resistencia a la fluencia del material base. Es fácil de encender y reencender, produciendo cordones de aspecto excelente y escoria autodesprendible. Soldadura de aceros AISI 316 / 316L. Soldadura de aceros inoxidables estabilizados de similar composición cuando la temperatura de trabajo es máxima de 350 °C. Contenido de Ferrita 3-10.

Clasificaciones:	ASME-SFA A5.4 /AWS A5.4, E316L-16 EN ISO 3581-A : E 19 12 3 L R 2 2
-------------------------	--

Tipo de Corriente:	CCEP
Aplicaciones:	Sacar tornillos rotos, reparación de rodillos, matrices, ejes, zarandas, reparación de brocas de perforación, fresas y componentes de hornos para altas temperaturas. Capa de enmantecado, reconstrucción, buttering, build up, y en caso de otras aplicaciones especiales, consultar con Soldaxa.

Propiedades Mecánicas Típicas			
Condición	Límite de Fluencia	Resistencia a la tracción	Elongación
Corno soldado	460 MPa	570 MPa	40% (en 2")

Composición Química (%)					
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0.02	0.6	0.8	18 - 20	12 - 14	2.6

Información Técnica Adicional	
Diámetro	Intensidad de Corriente
1.60 mm (1/16")	30 - 45 A
2.00 mm (5/64")	45 - 65 A
2.50 mm (3/32")	60 - 90 A
3.25 mm (1/8")	90 - 125 A
4.00 mm (5/32")	125 - 190 A
5.00 mm (3/16")	160 - 300 A

Información para pedidos	
NAZCA NOX 316L 1.60mm 2.00kg LT	0505553
NAZCA NOX 316L 2.00mm 2.00kg LT	0505554
NAZCA NOX 316L 2.50mm 4.00kg LT	0505555
NAZCA NOX 316L 3.25mm 4.00kg LT	0505556
NAZCA NOX 316L 4.00mm 5.00kg LT	0505557
NAZCA NOX 316L 5.00mm 5.00kg LT	0505558



ELECTRODOS (SMAW)
ELECTRODOS PARA ACERO INOXIDABLE



NAZCA NOX 312



Existen trabajos que realmente desafían sus conocimientos y habilidades de soldadura. Cuando este momento llegue, sea en el taller o en el campo, el electrodo que usted querrá tener es el Nazca Nox 312. Indicado para soldadura de aceros de composición química desconocida, de difícil soldabilidad o materiales disímiles y también para para sacar tornillos rotos y reparar piezas en los talleres. También empleado en otros tipos de acero inoxidable, aceros al manganeso, aceros rápidos, aceros para herramientas, etc. Deposita un acero inoxidable resistente a la corrosión bajo tensión, con buena resistencia a la oxidación superficial, hasta 1150 °C. Este electrodo presenta un arco suave, estable y de fácil control, con excelente remoción de escoria y óptimo perfil del cordón, sin socavaduras. No presenta salpicaduras durante su deposición.

Clasificaciones:	~ASME-SFA A5.4 /AWS A5.4, E312-16 EN ISO 3581-A : E 29 9 R 2 2
Tipo de Corriente:	CCEP
Aplicaciones:	Sacar tornillos rotos, reparación de rodillos, matrices, ejes, zarandas, reparación de brocas de perforación, fresas y componentes de hornos para altas temperaturas. Capa de enmantecado, reconstrucción, buttering, build up, y en caso de otras aplicaciones especiales, consultar con Soldaxa.

Propiedades Mecánicas Típicas

Condición	Límite de Fluencia	Resistencia a la tracción	Elongación
Como soldado	> 620 MPa	> 800 MPa	22% (en 2")

Composición Química (%)

C	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Ferrita FN
0.10	0.84	28.70	10.0	0.08	0.090	30 - 50

Información Técnica Adicional

Diámetro	Intensidad de Corriente
2.50 mm (3/32")	60 - 90 A
3.25 mm (1/8")	90 - 125 A
4.00 mm (5/32")	125 - 175 A
5.00 mm (3/16")	160 - 280 A

Información para pedidos

NAZCA NOX 312 2.50mm 4.00kg LT	0505549
NAZCA NOX 312 3.25mm 4.00kg LT	0505550
NAZCA NOX 312 4.00mm 5.00kg LT	0505551
NAZCA NOX 312 5.00mm 5.00kg LT	0505552



ELECTRODOS (SMAW)
ELECTRODOS PARA ACERO INOXIDABLE



NAZCA NOX 308L



Electrodo rutílico para soldar aceros tipo 19Cr10Ni. También es adecuado para soldar aceros estabilizados de composición similar, excepto cuando se debe cumplir con la resistencia a la deformación total del material base.

Clasificaciones:	ASME-SFA A5.4 /AWS A5.4, E308L-16 EN ISO 3581-A : E 19 9 L R 2 2
Contenido de Ferrita	3 - 10
Tipo de Corriente:	CCEP
Aplicaciones:	Aceros inoxidables no estabilizados, del tipo: AISI 301, 302, 304, 308, 301L, 302L, 304L y 308L. Para soldar cierto tipo de uniones en aceros disímiles. Cama cojín (base) para la aplicación posterior de recubrimientos protectores. Reconstrucción de equipos de minería, como los bordes de cucharones de draga, palas, lápices, etc. Ideal para la soldadura de piezas de acero al manganeso. Construcción de tanques, tuberías, ductos, empleados en la industria carvecera, lechera, textil y papelería. Industria química o petroquímica, donde no se presenta corrosión excesiva.

Propiedades Mecánicas Típicas

Condición	Límite de Fluencia	Resistencia a la tracción	Elongación
Como soldado	430 MPa (min)	560 MPa (min)	34% (min)

Composición Química (%)

C	Mn	Si	Ni	Cr	S	Ferrita FN
0.022	0.72	0.42	9.6	19.7	0.012	5

Información Técnica Adicional

Diámetro	Intensidad de Corriente
1.60 mm (1/16")	35 - 45 A
2.00 mm (5/64")	35 - 65 A
2.50 mm (3/32")	60 - 90 A
3.25 mm (1/8")	90 - 125 A
4.00 mm (5/32")	120 - 180 A
5.00 mm (3/16")	160 - 280 A

Información para pedidos

NAZCA NOX 308L 1.60mm 2.00kg LT	0505537
NAZCA NOX 308L 2.00mm 2.00kg LT	0505538
NAZCA NOX 308L 2.50mm 4.00kg LT	0505459
NAZCA NOX 308L 3.25mm 4.00kg LT	0505460
NAZCA NOX 308L 4.00mm 5.00kg LT	0505539
NAZCA NOX 308L 5.00mm 5.00kg LT	0505540



ELECTRODOS (SMAW)
ELECTRODOS PARA ACERO INOXIDABLE



NAZCA NOX 309L



Electrodo de acero inoxidable con elevado tenor de aleantes destinado a soldadura de aceros disímiles e inoxidables con composiciones similares. Posee excelentes características de soldabilidad en todas las posiciones, excepto en vertical descendiente.

Clasificaciones:	ASME-SFA A5.4 /AWS A5.4, E309L-16 EN 1600 : E 23 12 L R 3 2
Contenido de Ferrita	5 - 12

Tipo de Corriente:	CCEP
Aplicaciones:	Aceros inoxidables AISI 309 L y cualquiera del tipo 18/8, donde se requiera alta resistencia. Relleno de ejes de acero al carbono o de baja aleación, donde se necesita, además de buena soldabilidad, buena resistencia a la fricción metálica. Ideal para realizar uniones disímiles entre acero al carbono con acero inoxidable y acero inoxidable austenítico con acero inoxidable ferrítico. Unión y recubrimiento de aceros al manganeso y aceros de difícil soldabilidad. Unión de aceros al manganeso con aceros de baja aleación o aceros al carbono. Revestimiento de torres de craqueo. Fabricación y reparación de cajas para carburación, tuberías para conducción de fluidos corrosivos, etc.

Propiedades Mecánicas Típicas			
Condición	Límite de Fluencia	Resistencia a la tracción	Elongación
Como soldado	450 MPa	590 MPa	37% (en 2")

Composición Química (%)						
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ferrita FN
0.03	1.80	0.45	23.50	13.50	0.30	9

Información Técnica Adicional	
Diámetro	Intensidad de Corriente
2.50 mm (3/32")	50 - 90 A
3.25 mm (1/8")	80 - 120 A
4.00 mm (5/32")	95 - 170 A

Información para pedidos	
NAZCA NOX 309L 2.50mm 5.00kg LT	0505541
NAZCA NOX 309L 3.25mm 5.00kg LT	0505542
NAZCA NOX 309L 4.00mm 5.00kg LT	0505543

ANSI/AWS D1.1. 2000
Una Norma Nacional Americana

**Código para Soldadura
Estructural -
Acero**

**Sociedad Americana de
Soldadura**

4. Calificación

4.0 Alcance

Los requisitos para ensayos de calificación de las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) y personal de soldadura (WPQ), se describen a continuación:

Parte A-Requisitos Generales. Esta parte cubre los requisitos generales tanto para el WPS, así como para el desempeño del personal de soldadura.

Parte B-Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS). Esta parte cubre la calificación de las especificaciones de un procedimiento de soldadura (WPS), que no está clasificado como precalificado de acuerdo con la Sección 3.

Parte C-Calificación del Desempeño. Esta parte cubre los ensayos de calificación de desempeño requeridos por el código para determinar la capacidad de soldadores, operadores de soldadura o apuntaladores, para producir soldaduras sanas.

Parte A Requisitos Generales

4.1 Generalidades

Los requisitos para ensayos de calificación de las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) y personal de soldadura, (definidos como soldadores, operadores de soldadura y apuntaladores) se describen en esta sección.

4.1.1 Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS). Excepto para los WPSs precalificados de acuerdo con la Sección 3, un WPS para utilizar en soldadura de producción será calificado de acuerdo con la Sección 4, Parte B y será aprobada por el Ingeniero. Evidencia apropiadamente documentada, de una anterior calificación de WPS puede ser aceptada con la aprobación del Ingeniero. Los requisitos enunciados en el Anexo IV, Tabla IV – I “Requisitos del Código que pueden ser modificados por Ensayos de Calificación de Procedimiento”, pueden ser variados cuando el WPS es calificado por ensayos.

4.1.1.1 Responsabilidad de la Calificación. Cada fabricante o contratista conducirá los ensayos requeridos por este Código para calificar el WPS. WPSs, apropiadamente documentados y calificados bajo las consideraciones de este Código, por una Compañía que

posteriormente tiene un cambio de nombre, debido a una acción voluntaria o por fusión con una compañía similar, pueden emplear el nuevo nombre sobre estos documentos de WPS.

4.1.1.2 Anterior Calificación de WPS. El Ingeniero puede aceptar evidencia documentada apropiadamente, de una calificación anterior de los WPSs que serán empleados. La aceptabilidad de la calificación por otras normas es responsabilidad del Ingeniero, la cual estará basada sobre la estructura específica, ó condiciones de servicio ó ambas. Las Series B2.1, XXX-XX de la AWS sobre Norma de Especificaciones de Procedimiento de Soldadura puede, en esta manera, ser aceptada para emplearse en este código.

4.1.1.3 Requisitos de Ensayo de Impacto. Cuando lo requiere el diseño ó las especificaciones del Contrato, los ensayos de impacto deben ser incluidos en la calificación del WPS. Los ensayos de impacto, requisitos y procedimientos será conforme con lo estipulado en el Anexo III ó tal como es especificado en los documentos del contrato.

4.1.2 Calificación del Desempeño del Personal de Soldadura. Los soldadores, operadores de soldadura y apuntaladores a ser empleados bajo este código y que utilicen los procesos Soldadura por Arco Metálico Protegido (SMAW), Soldadura por Arco Sumergido (SAW), Soldadura por Arco y Gas de Protección (GMAW), Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno y Gas de Protección (GTAW), Soldadura por Arco con Electrodo con Núcleo de Fundente (FCAW), Soldadura por Electroescoria (ESW), ó Soldadura por Electrogas (EGW), serán calificados por los ensayos aplicables, tal como son descritos en la Parte C de esta sección. Ver comentarios.

4.1.2.1 Anterior Calificación del Desempeño. La evidencia, apropiadamente documentada, de anterior calificación del desempeño de soldadores, operadores de soldadura y apuntaladores, puede ser aceptada con la aprobación del Ingeniero. La aceptación de la Calificación del Desempeño por otras normas, es responsabilidad del Ingeniero, la cual estará basada sobre la estructura específica, ó condiciones del servicio ó ambas. Los soldadores y operadores de soldadura calificados según ensayo de la Norma AWS B2.1, “Norma para Procedimiento de Soldadura y Calificación

- (4) Soldaduras de ranura CJP para conexiones tubulares (ver 4.12).
- (5) Soldaduras de ranura PJP para conexiones tubulares en T, Y y K; y juntas a Tope (ver 4.13).
- (6) Soldaduras de tapón y ranura alargada para conexiones tubulares y no tubulares (ver 4.14).

4.6 Preparación de la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

El fabricante ó contratista debe preparar un WPS por escrito, que especifique todas las variables esenciales referenciadas en 4.7. Los valores especificados para estas variables de WPS deberán ser obtenidos del registro de calificación del procedimiento, PQR, el cual sirve como confirmación escrita de excelentes calificaciones del WPS.

4.7 Variables Esenciales

4.7.1 SMAW, SAW, GMAW, GTAW y FCAW. Cambios más allá de las limitaciones de las variables esenciales del PQR para los procesos SMAW, SAW, GMAW, GTAW y FCAW mostrados en la Tabla 4.5 requieren recalificación del WPS.

4.7.2 Soldadura con Electroescoria y Electrodeos. Ver Tabla 4.6 para los cambios de variable esencial del PQR que requieren una recalificación del WPS para los procesos EGW y ESW.

4.7.3 Calificación del Metal Base. Los metales base listados en la Tabla 3.1 que estén sujetos a ensayos de calificación en el WPS, deben calificar otros grupos de metal base de acuerdo a la Tabla 4.7. Los metales base que no estén listados en la Tabla 3.1 ó en el Anexo M deberán ser calificados en concordancia con la Sección 4 y tiene que ser aprobada por el Ingeniero.

Los WPS con aceros listados en el Anexo M, deberán además calificar los aceros de la Tabla 3.1 ó aceros del Anexo M, de conformidad con la Tabla 4.7. El Anexo M contiene recomendaciones para metal de aporte con resistencias iguales y temperaturas mínimas de calentamiento y de entre pases, para aceros ASTM A514, A517, A709 grado 100 y 100W, ASTM A710 grado A (clases 1 y 3) y ASTM A875 Grado 60 y 65.

Las menores temperaturas de precalentamiento y entre pases requeridos en la Tabla 3.2 ó calculadas por el Anexo XI, serán calificadas por ensayos aprobados por el Ingeniero.

4.8 Métodos de Ensayo y Criterio de Aceptación para la Calificación del (WPS)

Los ensayos de montajes soldados conforme a 4.8.2, tendrán muestras preparadas por corte de las plancha, tubería o entubado ensayados, tal como se muestra en las Figuras 4.7 hasta 4.11, cualquiera sea aplicable. Las muestras serán preparadas para su ensayo, de acuerdo con las Figuras 4.12, 4.13, 4.14, y 4.18, según sea aplicable.

4.8.1 Inspección Visual. Para una calificación aceptable, las soldaduras deben satisfacer los siguientes requisitos :

- (1) La soldadura debe estar libre de grietas.
- (2) Todos los cráteres deben estar llenos completamente en la sección transversal de la soldadura.
- (3) La cara de la soldadura debe estar llena hasta el borde de la superficie del metal base y la soldadura se debe fundir lentamente con el metal base. El socavado no debe exceder de 1/32 Pulg. (1 mm). El refuerzo de la soldadura no deberá exceder de 1/8 Pulg. (3mm).
- (4) La raíz de la soldadura debe ser inspeccionada y no debe tener evidencia de grietas, fusión incompleta o penetración inadecuada de la junta. Se permite una raíz de superficie cóncava dentro de los límites descritos presentados abajo, de tal manera que el espesor total de la soldadura sea igual o mayor que el del metal base.
- (5) La máxima concavidad de la superficie de la raíz debe ser de 1/16 Pulg. (1.6mm) y el máximo sobre espesor debe ser 1/8.(3mm). Para uniones tubulares en T, Y y K el sobre espesor de la raíz, se considera adecuado y no deberá ser causa de rechazo.

4.8.2 Ensayo No Destructivo. Antes de preparar las probetas para ensayo mecánico, la calificación de ensayo en plancha, tubería ó entubado, deben ser examinadas mediante ensayos no destructivos para verificar la sanidad de la soldadura, así como siguen:

4.8.2.1 RT ó UT. Cualquiera de los dos ensayos, radiográfico (RT) ó ultrasónico (UT), deben ser utilizados. La longitud total de la soldadura en las planchas de ensayo, excepto las longitudes de descarte ubicadas en los extremos, estas deben ser examinadas de acuerdo con la Sección 6 parte E ó F. Para tubulares, la circunferencia total de la soldadura acabada, debe ser examinada de acuerdo con la Sección 6 parte C.

4.8.2.2 Criterios de Aceptación en RT ó UT. Para una calificación aceptable, la soldadura que es revelada por ensayo radiográfico ó ultrasónico, debe estar conforme a los requisitos de la Sección 6 parte C.

4.8.3 Ensayo Mecánico. El ensayo mecánico debe ser como sigue :

4.32.2 Requisitos de Nueva Prueba de Apuntaladores.

4.32.2.1 Una Nueva Prueba sin Entrenamiento Adicional. En caso de falla para aprobar los requisitos de ensayo, el apuntalador puede realizar una nueva prueba sin entrenamiento adicional.

4.32.2.2 Nueva Prueba después de más Entrenamiento o Practica. Una nueva prueba puede ser realizada, con tal que el apuntalador haya tenido más entrenamiento o practica. Una nueva prueba completa debe ser exigida.

Anexo 8

TEMA:

“ELECCIÓN DEL MATERIAL DE APOORTE PARA LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DEL ACERO ASTM A516-GRADO 70 POR EL PROCESO SMAW.

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	PROBLEMA	JUSTIFICACIÓN	VARIABLES	NIVEL O TIPO DE INVESTIGACION
El acero ASTM A516-GRADO 70 es ampliamente utilizado en la fabricación de recipientes a presión y estructuras que operan en condiciones de carga moderada y temperaturas controladas. Sin embargo, su resistencia al desgaste y a la corrosión es limitada, lo que reduce su vida útil en aplicaciones exigentes. Para mejorar sus propiedades superficiales, se aplican recubrimientos mediante soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW), lo que permite incrementar la resistencia mecánica y química de la superficie expuesta. La selección del material de aporte adecuado es un factor crítico en la optimización del rendimiento del recubrimiento, ya que influye en la adherencia, la dureza, la resistencia al desgaste y la integridad estructural del revestimiento depositado. Sin embargo, la falta de criterios técnicos específicos para la elección del material de aporte puede derivar en problemas como fisuración, baja adherencia, pérdida prematura del recubrimiento o incluso fallas estructurales en el acero base. En este contexto, surge la necesidad de determinar qué material de aporte es el más adecuado para el recubrimiento del acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso SMAW, considerando factores como la compatibilidad metalúrgica, la dureza alcanzada en el depósito de soldadura y la calidad del recubrimiento en términos de defectos y propiedades mecánicas. .	¿Qué material de aporte será el más adecuado para el recubrimiento del acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso SMAW?	TECNOLOGICA Esta investigación aporta al conocimiento sobre la selección de materiales de aporte en el proceso SMAW, optimizando las propiedades del recubrimiento y su desempeño en condiciones reales de operación. Además, el estudio contribuirá al desarrollo de procedimientos de soldeo más eficientes y con mejores estándares de calidad, lo que permitirá a la industria contar con soluciones tecnológicas más avanzadas y confiables en la protección del acero ASTM A516-GRADO 70. SOCIAL El incremento en la vida útil y seguridad de las estructuras fabricadas con acero ASTM A516-GRADO 70 beneficia a sectores industriales que dependen de equipos confiables, como el energético, el petroquímico y el manufacturero. Asimismo, el desarrollo de criterios técnicos para la selección de materiales de aporte puede servir como referencia para soldadores, ingenieros y técnicos, mejorando la capacitación y fomentando mejores prácticas en el sector metalmecánico. ECONOMICA	INDEPENDIENTES: - Intensidad de corriente. - Velocidad de soldeo. - Polaridad de corriente. - Composición química del material de aporte utilizado en el proceso SMAW. DEPENDIENTES: Calidad de recubrimiento.	- Exploratorio - Descriptivo - Correlacional - Explicativa
	OBJETIVO GENERAL			POBLACION Y MUESTRA
	Seleccionar el material de aporte más adecuado para el recubrimiento del acero ASTM A516-GRADO 70 mediante el proceso SMAW, en función de sus propiedades mecánicas y calidad metalúrgica.		POBLACION: Electrodos revestidos para soldadura de aceros al carbono por el proceso SMAW. MUESTRA: Acero ASTM A516-GRADO 70 .	
	OBJETIVOS ESPECIFICOS - Analizar el impacto de la composición química del material de aporte en la calidad del recubrimiento aplicado sobre el acero ASTM A516-GRADO 70. - Evaluar la variación de dureza del recubrimiento en		TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS:	
			HIPÓTESIS GENERAL	TECNICAS: Se usará la técnica de la “inspección visual y dobles en U”. EQUIPOS Y MATERIALES - Electrodos revestidos - Máquina de soldar

	función del material de aporte seleccionado. • Determinar la relación entre la selección del material de aporte y su incidencia en la formación de discontinuidades del recubrimiento, considerando la presencia de posibles defectos.	La aplicación de recubrimientos duros mediante el proceso SMAW permite extender la vida útil de componentes fabricados con acero ASTM A516-GRADO 70, reduciendo la necesidad de reemplazo frecuente y los costos asociados a mantenimiento correctivo. La selección óptima del material de aporte contribuye a minimizar el consumo de insumos, optimizar el uso de recursos y reducir costos operativos en industrias que emplean este tipo de acero, como la fabricación de recipientes a presión y estructuras sometidas a desgaste. AMBIENTAL La optimización del material de aporte en los recubrimientos de soldadura reduce el desperdicio de material y el impacto ambiental asociado a la fabricación y disposición de piezas desgastadas. Además, al prolongar la vida útil de los componentes, se disminuye la generación de residuos metálicos y la demanda de nuevos materiales, lo que contribuye a un uso más sostenible de los recursos naturales y a la reducción de la huella de carbono en los procesos industriales.	<table><tr><th>HIPOTESIS ESPECIFICAS</th></tr><tr><td> • - La composición química del material de aporte tiene un impacto directo en la calidad del recubrimiento, influyendo en su resistencia a la corrosión y adhesión al sustrato de acero ASTM A516-GRADO 70. • La dureza del recubrimiento varía en función del material de aporte utilizado, debido a diferencias en su composición y su comportamiento metalúrgico durante la solidificación. • La selección del material de aporte afecta la presencia de discontinuidades en el recubrimiento, tales como porosidad, fisuración y falta de fusión, falta de penetración, etc. </td></tr></table>	HIPOTESIS ESPECIFICAS	• - La composición química del material de aporte tiene un impacto directo en la calidad del recubrimiento, influyendo en su resistencia a la corrosión y adhesión al sustrato de acero ASTM A516-GRADO 70. • La dureza del recubrimiento varía en función del material de aporte utilizado, debido a diferencias en su composición y su comportamiento metalúrgico durante la solidificación. • La selección del material de aporte afecta la presencia de discontinuidades en el recubrimiento, tales como porosidad, fisuración y falta de fusión, falta de penetración, etc.	<table><tr><td> • Durómetro. </td></tr><tr><td>VIABILIDAD</td></tr><tr><td>El presente trabajo de investigación es viable, porque se cuenta con los equipos y materiales necesarios para la experimentación y control de calidad.</td></tr></table>	• Durómetro.	VIABILIDAD	El presente trabajo de investigación es viable, porque se cuenta con los equipos y materiales necesarios para la experimentación y control de calidad.
HIPOTESIS ESPECIFICAS									
• - La composición química del material de aporte tiene un impacto directo en la calidad del recubrimiento, influyendo en su resistencia a la corrosión y adhesión al sustrato de acero ASTM A516-GRADO 70. • La dureza del recubrimiento varía en función del material de aporte utilizado, debido a diferencias en su composición y su comportamiento metalúrgico durante la solidificación. • La selección del material de aporte afecta la presencia de discontinuidades en el recubrimiento, tales como porosidad, fisuración y falta de fusión, falta de penetración, etc.									
• Durómetro.									
VIABILIDAD									
El presente trabajo de investigación es viable, porque se cuenta con los equipos y materiales necesarios para la experimentación y control de calidad.									
IMPORTANCIA									
La importancia de los recargues radica en el hecho de que las piezas y componentes de las máquinas industriales se ven constantemente sometidas a desgaste por distintos factores que van a afectar a su rendimiento. Por lo que el mantenimiento y reparación de dichas piezas por soldadura es un aspecto de gran importancia en el sector industrial. . .									