

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



Tesis

**EFFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN LA MICROESTRUCTURA Y DUREZA EN
JUNTAS SOLDADAS POR EL PROCESO SMAW DEL ACERO MICROALEADO**

HARDOX 450

(Investigación tecnológica)

Presentado por los bachilleres:

RONALD REYES CERECEDA

ERIKA DANITZA TACO TAIPE

Para optar al título profesional de Ingeniero

Metalúrgico

Asesor:

Ing. Mgt. Elías Teodoro Peña Peña

CUSCO – PERÚ

2023

DEDICATORIA

A Dios por haber permitido llegar hasta aquí hoy, por darme fuerza y salud para llevar a cabo mis metas y objetivos. Quiero darle las gracias por su amor infinito.

A mis padres, Alberto Reyes Pumayali y Yenny Cereceda Huamani, por ser mi motor, apoyarme en cada paso, por sus consejos y la educación que me han brindado y también a mi hermana y demás familiares.

A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

A todas aquellas personas que dudaron y no creyeron en mí, aquellos que esperaban que fracasara en la culminación de mis estudios, aquellos que me subestimaron por no crearme capaz y a todos aquellos que pensaron que me rendiría en esta lucha.

“Tener conocimiento no es suficiente, tenemos que aplicarlo. Tener voluntad no basta hay que implementarla”

Ronald Reyes Cereceda

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con todo mi amor y cariño a ti
Dios que me diste la oportunidad de vivir y de
regalarme una familia maravillosa.

Con mucho cariño principalmente a mis padres,
Maria Cristina Taipe Tinta Y Adolfo Taco Cjuno.
Gracias por darme una carrera para mi futuro y por
creer en mí. Uds. siempre han estado apoyándome y
brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco
de corazón el que estén conmigo a mi lado.

Los quiero con todo mi corazón y este trabajo
es para ustedes, por ser la hija mayor aquí esta lo que
ustedes me brindaron, solamente les estoy
devolviendo lo que ustedes me dieron en un principio.

A mis hermanos; Rosa María, Frank Erick y
Ángel Di María, Juan Gualberto Yauri Tinta y de la
misma manera a Ronald Reyes Cereceda, por su apoyo,
comprensión, cariño hacia mi persona y que estuvieron
en los momentos más difíciles y felices de mi vida.

*“Para comenzar un proyecto hace falta valentía y para culminar un proyecto hace falta
perseverancia y amor”*

Erika Danitza Taco Taipe

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes apoyándome y orientándome.

Mi profundo agradecimiento por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo, a toda la Escuela Profesional De Ingeniería Metalúrgica, a mis docentes quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

A mis amigos que gracias a su apoyo moral me permitieron permanecer con empeño, dedicación y cariño, y a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito la meta propuesta.

Ronald Reyes Cereceda

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme bendiciones y guiar mi camino.

Mi especial, sincero y eterno agradecimiento a:

A la Universidad Nacional San Antonio Abad Del Cusco, autoridades y docentes por abrirme las puertas para hacer realidad mis sueños.

Agradezco a todos los docentes de la Escuela Profesional De Ingeniería Metalúrgica, que, gracias a sus sabias enseñanzas, valiosas experiencias y conocimientos pude formarme de manera correcta en lo que concierne a mi educación académica.

De manera especial a mi compañero de tesis, Ronald Reyes Cereceda, por la oportunidad brindada, su constante apoyo para la elaboración de la presente tesis de investigación, por su amistad y buenos consejos que fueron clave para mi formación personal, muchas gracias.

A los ingenieros del dictamen, por su valioso tiempo, para revisar el trabajo.

A los ingenieros, miembros del jurado de sustentación, para su culminación viable de este trabajo de investigación.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica por su amistad y apoyo durante mi formación profesional.

Y a todas las personas que tal vez me olvide un afecto especial y reconocimiento profundo.

Erika Danitza Taco Taipe

PRESENTACIÓN

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

Señores Docentes, miembros del Jurado:

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra disposición la tesis colectiva intitulada: EFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN LA MICROESTRUCTURA Y DUREZA EN JUNTAS SOLDADAS POR EL PROCESO SMAW DEL ACERO MICROALEADO HARDOX 450. (Investigación Tecnológica).

El presente trabajo de investigación, busca llenar el vacío de conocimiento que existe con respecto a los problemas de soldabilidad del acero Hardox 450. Este trabajo será de gran ayuda a las personas interesadas en el conocimiento de una nueva tecnología para la soldadura.

Ronald Reyes Cereceda

Erika Danitza Taco Taipe

RESUMEN

El propósito de este trabajo, es investigar el efecto que produce el calor de entrada o calor de aporte sobre la microestructura y dureza del acero Hardox 450 producido por el proceso SMAW. Para la realización de este trabajo, se utilizaron cinco (5) probetas de acero Hardox 450, los cuales fueron soldados por el proceso SMAW con diferentes parámetros de soldabilidad, las probetas fueron sometidas a pruebas de ensayos no destructivos tales como el ensayo visual, líquidos penetrantes y ensayos destructivos, entre los cuales podemos mencionar el ensayo de doblez, ensayo de dureza, también se realizó un examen metalográfico para determinar la influencia del calor de soldadura sobre la microestructura y determinar su incidencia en las propiedades mecánicas del acero Hardox 450, específicamente hablamos de la dureza. De los resultados observamos, que, sí hay una influencia determinante del aporte de calor sobre la microestructura, lo que determina también cambios en sus propiedades mecánicas, especialmente sobre la dureza.

Palabras clave: Calor de entrada, microestructura, dureza, proceso SMAW, acero microaleado

ABSTRACT

The purpose of this work is to investigate the effect produced by input heat or input heat on the microstructure and hardness of Hardox 450 steel produced by the SMAW process. To carry out this work, five (5) Hardox 450 steel specimens were used, which were welded by the SMAW process with different weldability parameters, the specimens were subjected to non-destructive testing tests such as visual testing, penetrating liquids and destructive tests, among which we can mention the bending test, hardness test, a metallographic examination was also carried out to determine the influence of welding heat on the microstructure and determine its incidence on the mechanical properties of Hardox 450 steel, specifically we spoke of hardness. From the results we observe that there is a determining influence of the heat input on the microstructure, which also determines changes in its mechanical properties, especially on hardness.

Keywords: Input heat, microstructure, hardness, SMAW process, micro alloyed steel

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
AGRADECIMIENTO	5
PRESENTACIÓN	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE	9
ÍNDICE DE TABLAS	13
ÍNDICE DE FIGURAS	14
SIMBOLOGÍA	16
CAPÍTULO I	18
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.1. Planteamiento del Problema	18
1.2. Problema General y Específicos	19
1.2.1. Problema General	19
1.2.2. Problemas Específicos.....	19
1.3. Justificación.....	19
1.3.1. Justificación Tecnológica.....	19
1.3.2. Justificación Económica	20
1.3.3. Justificación Social.....	20
1.3.4. Justificación Ambiental	20
1.4. Importancia.....	20
1.5. Objetivos	21
1.5.1. Objetivo General	21
1.5.2. Objetivos Específicos.....	21
1.5.3. Hipótesis General.....	21
1.5.4. Hipótesis Específicos	21
1.6. Variables.....	22
1.6.1. Variables independientes	22
1.6.2. Variables dependientes	22

1.6.3.	Variables intervinientes	23
CAPÍTULO II		24
MARCO TEÓRICO		24
2.1.	Antecedentes Nacionales e Internacionales.....	24
2.1.1.	Antecedentes Nacionales.....	24
2.1.2.	Antecedentes Internacionales	25
2.2.	Acero Hardox 450	25
2.3.	Procesos de Soldadura.....	26
2.3.1.	Soldadura por Arco con Alambre y Protección Gaseosa (GMAW)	28
2.3.2.	Soldadura por Arco con Alambre Tubular (FCAW)	28
2.3.3.	Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno y Protección Gaseosa (GTAW)	29
2.3.4.	Soldadura por Arco Sumergido (SAW).....	30
2.3.5.	Soldadura por Arco de Plasma (PAW).....	30
2.3.6.	Soldadura por Electroescoria (ESW)	31
2.3.7.	Soldadura con Gas Oxidcombustible (OFW)	32
2.3.8.	Soldadura de Espárragos (SW).....	33
2.3.9.	Soldadura con Rayo Láser (LBW)	33
2.3.10.	Soldadura por Haz de Electrones (EBW).....	34
2.4.	Soldadura por Arco de Metal Protegido (SMAW).....	34
2.4.1.	Definición y Descripción General	35
2.4.2.	Principio de Funcionamiento	35
2.4.3.	Ventajas y Limitaciones del Proceso	37
2.4.4.	Características del Arco.....	38
2.4.5.	Variables de Soldeo del Proceso SMAW	41
2.5.	Tipos de Juntas.....	47
2.6.	Posiciones de Soldadura	47
2.7.	Zonas Metalúrgicas de la Soldadura	48
2.7.1.	Zona de Fusión (ZF).....	49
2.7.2.	Zona Afectada por el Calor (ZAC)	49
2.7.3.	Metal Base (MB).....	50
2.8.	Ciclo Térmico de la Soldadura.....	50
2.8.1.	Importancia del Ciclo Térmico	50
2.8.2.	Cambios de Temperatura Durante el Soldeo (Ciclo Térmico)	51

2.8.3.	Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco ...	51
2.9.	Ecuación de la Temperatura Máxima en Cada Punto de la ZAC.....	53
2.10.	Cálculo del Ancho de la ZAC.....	55
2.11.	Velocidad de Enfriamiento.....	55
2.12.	Tiempo de Solidificación	57
2.13.	Carbono Equivalente.....	58
2.14.	Ensayos no Destructivos y Destructivos.....	59
2.14.1.	Ensayo no Destructivo	59
2.14.2.	Ensayos Destructivos	64
2.15.	Imperfecciones (Discontinuidades) en las Uniones Soldadas.....	67
2.15.1.	Clasificación de Discontinuidades.....	68
2.15.1.1.	Discontinuidades Superficiales	68
2.15.1.2.	Discontinuidades Internas	73
2.16.	Dureza Brinell (HBW)	81
2.17.	Microestructura de los Aceros.....	82
2.18.	La transformación isotérmica de la austenita: Las curvas TTT o de la "S"	87
2.19.	Crecimiento de Grano Austenítico.....	89
2.19.1.	Tamaño de grano	89
2.19.2.	Clasificación de los tamaños de grano	90
2.19.3.	Control del tamaño del grano	90
2.20.	Temperatura de precalentamiento y velocidad de enfriamiento crítica.....	91
2.21.	Calificación del Procedimiento.....	92
2.21.1.	Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)	92
2.21.2.	Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)	92
CAPÍTULO III		93
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		93
3.1	METODOLOGÍA	93
3.1.1	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	93
3.1.1.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	93
3.1.1.2	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	93
3.1.2	MÉTODO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	94
3.1.2.1	MÉTODO	94
3.1.2.2	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	94

3.1.3	POBLACIÓN Y MUESTRA	94
3.1.3.1	POBLACIÓN	94
3.1.3.2	MUESTRA	94
3.1.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLECTA DE DATOS	95
3.1.4.1	TÉCNICA	95
3.1.4.2	INSTRUMENTOS	95
3.2	VIABILIDAD.....	95
3.3	MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	96
CAPITULO IV.....		97
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....		97
4.1	Equipos y Materiales Utilizados en la Investigación	97
4.1.1	Equipos para la Investigación.....	97
4.2	Materiales Usados para la Experimentación	99
4.3	Soldadura de las Probetas.....	101
4.3.1	Preparación de las Probetas	101
4.4	Soldadura de las Probetas.....	103
4.5	Cálculo del Calor Aportado	111
4.6	Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor	112
4.7	Cálculo de la Velocidad de Enfriamiento	113
4.8	Ensayo de Dureza.....	114
4.9	Control de calidad.....	115
CAPÍTULO V.....		124
DISCUSION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		124
5.1	Resultados.....	124
5.2	Análisis de resultados	126
CONCLUSIONES.....		132
RECOMENDACIONES.....		134
BIBLIOGRAFÍA.....		135
ANEXOS		138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas del acero HARDOX 450	26
Tabla 2 Composición química del acero HARDOX 450	26
Tabla 3 Comparación entre Corriente continua y Corriente alterna.....	46
Tabla 4 Eficiencias térmicas de diferentes procesos de soldadura.	52
Tabla 5 Escalas de dureza Rockwell	65
Tabla 6 Muestra de características	99
Tabla 7 Composición química (valores máximos) del acero HARDOX 450	100
Tabla 8 Composición química.....	101
Tabla 9 Dimensiones de la probeta de experimentación.....	103
Tabla 10 Condiciones para realizar la soldadura de raíz	104
Tabla 11 Parámetros de soldadura.....	104
Tabla 12 Especificaciones para la soldadura probeta 1	105
Tabla 13 Especificaciones para la soldadura probeta 2	106
Tabla 14 Especificaciones para la soldadura probeta 3	107
Tabla 15 Especificaciones para la soldadura probeta 4	108
Tabla 16 Especificaciones para la soldadura probeta 5	109
Tabla 17 Dimensión de las indentaciones y cálculo del grado de carga	115
Tabla 18 Resultados de la prueba de dobléz	121
Tabla 19 Resultados del calor neto aportado.....	124
Tabla 20 Resultados del cálculo del ancho de la ZAC	124
Tabla 21 Resultados de la prueba de dureza	125
Tabla 22 Resultados de la inspección visual	125
Tabla 23 Resultados de la inspección visual por tintes penetrantes (fluorescentes)	126
Tabla 24 Resultados del ensayo de dobléz	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema principal de procesos de soldadura	27
Figura 2 Soldadura por arco con alambre y protección gaseosa	28
Figura 3 Soldadura por arco con alambre tubular autoprotegida	29
Figura 4 Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa	29
Figura 5 Soldadura por arco sumergido	30
Figura 6 Soldadura por arco de plasma.....	31
Figura 7 Esquema de la soldadura por electroescoria.....	32
Figura 8 Soldadura oxiacetilénica.....	33
Figura 9 Elementos de circuito típico para soldadura por arco de metal protegido	36
Figura 10 Soldadura por arco con electrodo revestido	36
Figura 11 Tipos de juntas	47
Figura 12 Posiciones de las soldaduras	47
Figura 13 Zonas de la soldadura	48
Figura 14 Diagrama de Graville para la clasificación de aceros	59
Figura 15 Matriz de ensayo de dobléz.....	66
Figura 16 Soldadura en cara y raíz	67
Figura 17 Exceso de penetración	68
Figura 18 Falta de penetración.....	69
Figura 19 Concavidades	69
Figura 20 Socavaduras o mordeduras de borde.....	70
Figura 21 Quemado	71
Figura 22 Salpicaduras	71
Figura 23 Falta de continuidad del cordón.....	72
Figura 24 Fisuras longitudinales.....	73
Figura 25 Fisuras en frío	74
Figura 26 Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)	75
Figura 27 Fisuras en frío (ZAC).....	77
Figura 28 Desgarre laminar en juntas en cruz.....	77
Figura 29 Desgarre laminar en T.....	78
Figura 30 Desgarre laminar en L.....	78
Figura 31 Falta de penetración.....	78
Figura 32 Falta de fusión.....	79

Figura 33 Falta de fusión entre pasadas	80
Figura 34 Símbolos que describen la dureza Brinell.....	81
Figura 35 Fuente de poder	97
Figura 36 Durómetro de banco.....	98
Figura 37 Equipo para ensayo de doblez guiado.....	99
Figura 38 Preparación de las probetas.....	102
Figura 39 Características del bisel.	102
Figura 40 Probetas para la soldadura.	103
Figura 41 Soldabilidad de las probetas	110
Figura 42 Probetas soldadas.....	110
Figura 43 Las curvas representan momentos diferentes durante la soldadura	115
Figura 44 Limpieza mecánica (a) y química (b)	116
Figura 45 Aplicación del removedor	117
Figura 46 Limpieza del exceso de penetrante Limpieza del exceso de penetrante	118
Figura 47 Aplicación del revelador	118
Figura 48 Limpieza de la probeta	119
Figura 49 Aplicación de carga en la parte central de la probeta	120
Figura 50 Probeta para la prueba de doblez	120
Figura 51 Microestructura del metal base Hardox 450 (Aumento 100 X).....	122
Figura 52 Microestructura de la ZAC (Aumento 100 X)	122
Figura 53 Microestructura de la zona de fusión.....	123

SIMBOLOGÍA

AWS	American Welding Society (Sociedad Americana De Soldadura)
ZAC	Zona Afectada por el Calor
MB	Metal base
DS	Depósito de soldadura
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Soldadura por Arco de Metal Protegido)
GMAW	Gas Metal Arc Welding (Soldadura por Arco de Metal y Gas)
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding (Soldadura por Arco de Tungsteno y Gas)
MIG	Metal Inert Gas (Gas Inerte Metálico)
TIG	Tungsten Inert Gas (Gas Inerte de Tungsteno)
H	Calor de aporte
H_{net}	Calor de aporte neto
V	Tensión o Diferencia de potencial (Voltio)
I	Intensidad de corriente (Amperios)
v	Velocidad de soldeo (m/s)
f	Eficiencia térmica
°C	Grados Celsius
DCEP	Corriente continua, electrodo al polo positivo
t	Abertura de raíz
a	Cara de la raíz
e	Espesor nominal del material base o de la placa
ASTM	American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para la prueba de materiales)

CE	Carbono Equivalente
HSLA	High strength low alloy Steel (acero de alta resistencia y baja aleación)
WPS	Welding Procedure Specification (Especificación del Procedimiento de Soldadura)
ZF	Zona Fundida
S.A.A.	Sociedad Anónima Abierta
“X”	Junta a tope en doble “V”
H	Calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión (J)
r	Densidad (kg/m^3)
Cs	Calor específico del material sólido ($J/kg\ ^\circ C$)
T _m	Temperatura de fusión del metal ($^\circ C$)
T ₀	Temperatura inicial, generalmente la ambiente ($^\circ C$)
H _f	Calor de fusión (J/kg)
C _l	Calor específico en peso del metal líquido ($J/kg\ ^\circ C$)
W	Ancho del cordón de soldadura (m)
P	Penetración (m)

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

Dado el avance acelerado en la fabricación de nuevos aceros, no siempre se dispone de los conocimientos necesarios para predecir el comportamiento de los mismos como componentes de una junta soldada. Hoy en día la industria del acero ha desarrollado aceros aleados con un gran número de elementos metálicos que le dan mejores propiedades de resistencia, estos aceros actualmente son denominados aceros de alta resistencia al desgaste y son utilizados en las diferentes industrias, tales como: la construcción, minería, automotriz, agricultura, siderúrgica, cementera, agroindustria, etc.

Estos aceros relativamente nuevos con estructuras complejas, presentan un gran reto para las tecnologías de soldadura actuales por lo que se requiere un mayor conocimiento de cómo estos materiales pueden ser soldados conservando las propiedades originales y así poder cumplir el desempeño de las uniones soldadas. En nuestra región las factorías que se dedican a la soldadura del acero Hardox 450 desconocen las propiedades mecánicas, su composición química y son soldados sin tomar en cuenta las características del acero. Desconocen la influencia del aporte de calor sobre la microestructura, el cual altera o cambia sus propiedades mecánicas. A consecuencia de este desconocimiento se obtiene cordones con defectos, los que provocan una serie de incidentes. Por lo dicho anteriormente, planteamos el problema siguiente:

¿Qué efecto producirá el calor de entrada en la microestructura en juntas soldadas del acero micro aleado HARDOX 450 por el proceso SMAW?

1.2. Problema General y Específicos

1.2.1. Problema General

¿Qué cambio producirá el calor de entrada en la microestructura en juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW?

1.2.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cómo influye la intensidad de corriente en relación al calor de entrada sobre la microestructura en la zona afectada por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW?
- b) ¿Cómo influye la velocidad de avance en relación al calor de entrada sobre la microestructura en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW?
- c) ¿Cómo influye la composición química del metal base en relación al aporte de calor en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW?
- d) ¿Qué cambio producirá el aporte de calor sobre la granulación hereditaria en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Tecnológica

Se pretende llenar el vacío de conocimiento en la fabricación de conjuntos soldados utilizando el acero Hardox 450 considerando diferentes parámetros de aporte de calor lo que garantiza la obtención de uniones de buena calidad y comportamiento.

1.3.2. Justificación Económica

Al conseguir uniones de buena calidad por el proceso SMAW y buen comportamiento en servicio, se estará consiguiendo prolongar la vida útil del acero Hardox, esto redundará en un ahorro económico.

1.3.3. Justificación Social

Con el conocimiento de los diferentes parámetros de soldeo para la fabricación de conjuntos soldados utilizando el acero microaleado, se permitirá formar técnicos con vastos conocimientos, lo que facilitará su labor de soldador para la consecución de soldadura libres de imperfecciones con el consiguiente ahorro de reparaciones y rechazos de conjuntos soldados.

1.3.4. Justificación Ambiental

Con el desarrollo de nuevos parámetros de soldeo para la fabricación de conjuntos soldados utilizando el acero Hardox se dará fiabilidad a dicho conjunto soldado, lo que permite disminuir los desechos del acero hacia el medio ambiente.

1.4. Importancia

El presente trabajo de investigación reviste importancia en el conocimiento de los diferentes parámetros de soldeo para la fabricación de conjuntos soldados utilizando el acero microaleado HARDOX 450 utilizando el proceso SMAW. Contribuye a la obtención de uniones soldadas de calidad, lo que garantiza un buen rendimiento de las estructuras y se evitaría efectos negativos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar el cambio que producirá el calor de entrada sobre la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450, bajo diferentes condiciones de entrada de calor, utilizando el proceso de soldadura SMAW.

1.5.2. Objetivos Específicos

- a) Evaluar el calor de entrada en relación a la intensidad de corriente utilizado en la soldadura de juntas de acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW.
- b) Evaluar el calor de entrada en relación a la velocidad de avance en las juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW.
- c) Evaluar el calor de entrada en relación a la composición química del metal base de las juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW.
- d) Evaluar el efecto del aporte de calor sobre la granulación hereditaria en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW.

1.5.3. Hipótesis General

El calor de entrada aplicado por el proceso SMAW para la soldadura del acero de alta resistencia HARDOX 450 produce en la zona afectada por el calor (ZAC) cambios microestructurales.

1.5.4. Hipótesis Específicos

- a) La intensidad de corriente influye de manera significativa en el aporte de calor aplicado en la soldadura del acero Hardox 450 por el proceso SMAW.

- b) La velocidad de avance influye en el calor de entrada sobre las juntas soldadas del acero Hardox 450 por el proceso SMAW.
- c) La composición química del metal base influye en el aporte de calor de las juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW.
- d) El aporte de calor influye sobre la granulación hereditaria en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW.

1.6. Variables

Se toma en consideración variables independientes, dependientes e intervinientes en la presente investigación.

1.6.1. Variables independientes

Las variables independientes se detallan a continuación y son las que estarán sujetas a cambios o modificaciones con el fin de estudio de la investigación.

- ✓ Intensidad de corriente (A)
- ✓ Tensión eléctrica (V)
- ✓ Velocidad de avance (mm/s)
- ✓ Longitud de arco (mm)

1.6.2. Variables dependientes

Las variables dependientes se mencionan a continuación y estas son dependientes de las modificaciones de los valores que tomen las variables independientes.

- ✓ Aporte de calor neto (J/mm)
- ✓ Tipo de microestructura (morfología y tamaño de grano)

1.6.3. Variables intervinientes

Las variables intervinientes se detallan a continuación y son las que de alguna forma influenciará sobre las variables dependientes.

- ✓ Temperatura ambiental (°C)
- ✓ Composición química del metal base (%)
- ✓ Composición química del metal de aporte (%)
- ✓ Diámetro del material de aporte (mm)
- ✓ Destreza del soldador

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Nacionales e Internacionales

2.1.1. *Antecedentes Nacionales*

(Díaz Quiñones & Vargas Goñas, 2014) en su trabajo de investigación intitulado “Efecto de la Temperatura de Pre calentamiento Sobre la Susceptibilidad a Fisuración en Frio, Dureza y Tenacidad de la Entalla en la Soldadura del Acero Hardox 450, utilizando Proceso GMAW”, analiza el efecto de la temperatura de pre calentamiento en el rango de 100 a 260°C sobre la susceptibilidad a la fisuración en frio, dureza y tenacidad a la entalla de la unión soldada de planchas de 10 mm de espesor por proceso GMAW de acero Hardox 450, para tal efecto se utilizó probetas de 50 x 76 x 10 mm, con junta en “V” y con separación de raíz de 1 mm los cuales se soldaron por el proceso GMAW. Se evaluaron la dureza bajo la norma AWS A5.1 mediante un durómetro Identec y la observación microestructura se registró mediante un microscopio Leica DM6000. Los resultados obtenidos indican el efecto beneficioso del pre calentamiento reduciendo la susceptibilidad a la fisuración en frio determinando un rango optimo entre 140° y 180°C; en todas las probetas la ZF mostro cristalización columnar y exclusivamente ferrita tipo primaria además de aciculares de segundas fases; respecto de la tenacidad a la entalla con muesca en V la unión soldada mostro deformación elástica salvo una estrecha franja cerca del cordón la cual es susceptible a deformación plástica.

(Valka, 2019), el objetivo en su trabajo de investigación es encontrar un procedimiento de soldadura adecuado para no dañar las propiedades de resistencia al desgaste. La experimentación se realizó sobre tres probetas bajo diferentes condiciones de pre calentamiento. Se pudo determinar

el efecto de la influencia del proceso de soldadura según las propiedades mecánicas de los aceros anti desgaste Hardox, las cuales quedaron cuantificados sus propiedades mecánicas en cada una de las pruebas realizadas.

2.1.2. Antecedentes Internacionales

(Chavira, 2016), en su trabajo de investigación “Reducción del Defecto de Falta de Fusión en Soldadura para el Proceso GMAW en acero Hardox 450 en la Fabricación de Cajas para Camión”, ejecutado en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales en el año 2016, se plantea como objetivo, implementar modificaciones dimensionales a la junta para la reducción o eliminación del defecto de falta de fusión en uniones de placas de acero Hardox 450, mediante el proceso de soldadura GMAW empleados en la fabricación de cajas para camión. Para dicho estudio se usaron probetas de acero Hardox 450, con espesor de 25 mm, 7 pulgadas de ancho por 14 pulgadas de largo, los cuales se soldaron con juntas en doble V, a las probetas de experimentación se realizaron pruebas de END y ED, concluyéndose que la unión formada en las probetas permite tener microestructuras y durezas en rangos similares, lo que ayuda a resistir mejor las cargas.

2.2. Acero Hardox 450

La chapa de acero anti desgaste Hardox – 450, posee buenas propiedades estructurales. Ofrece una alta resistencia, dureza excepcional y gran resistencia a impactos, es un acero adecuado para trabajos muy exigentes. Su buena resistencia al desgaste se traduce en una vida útil más prolongada. Este acero combina una soldabilidad y capacidad de plegado óptimo.

En las tablas 1 y 2, se detalla sus propiedades mecánicas y composición química.

Tabla 1*Propiedades mecánicas del acero HARDOX 450*

Espesor (mm)	Dureza (HB)	Límite de elasticidad (MPa)
2.00 -8.00	425 – 475	1250

Fuente: www.ssab.com

Tabla 2*Composición química del acero HARDOX 450*

Tipo	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%B
HARDOX 450	0.18	1.30	0.25	0.015	0.004	0.10	0.04	0.10	0.003

Fuente: www.ssab.com

Aplicaciones del acero Hardox 450:

Tienen aplicación en:

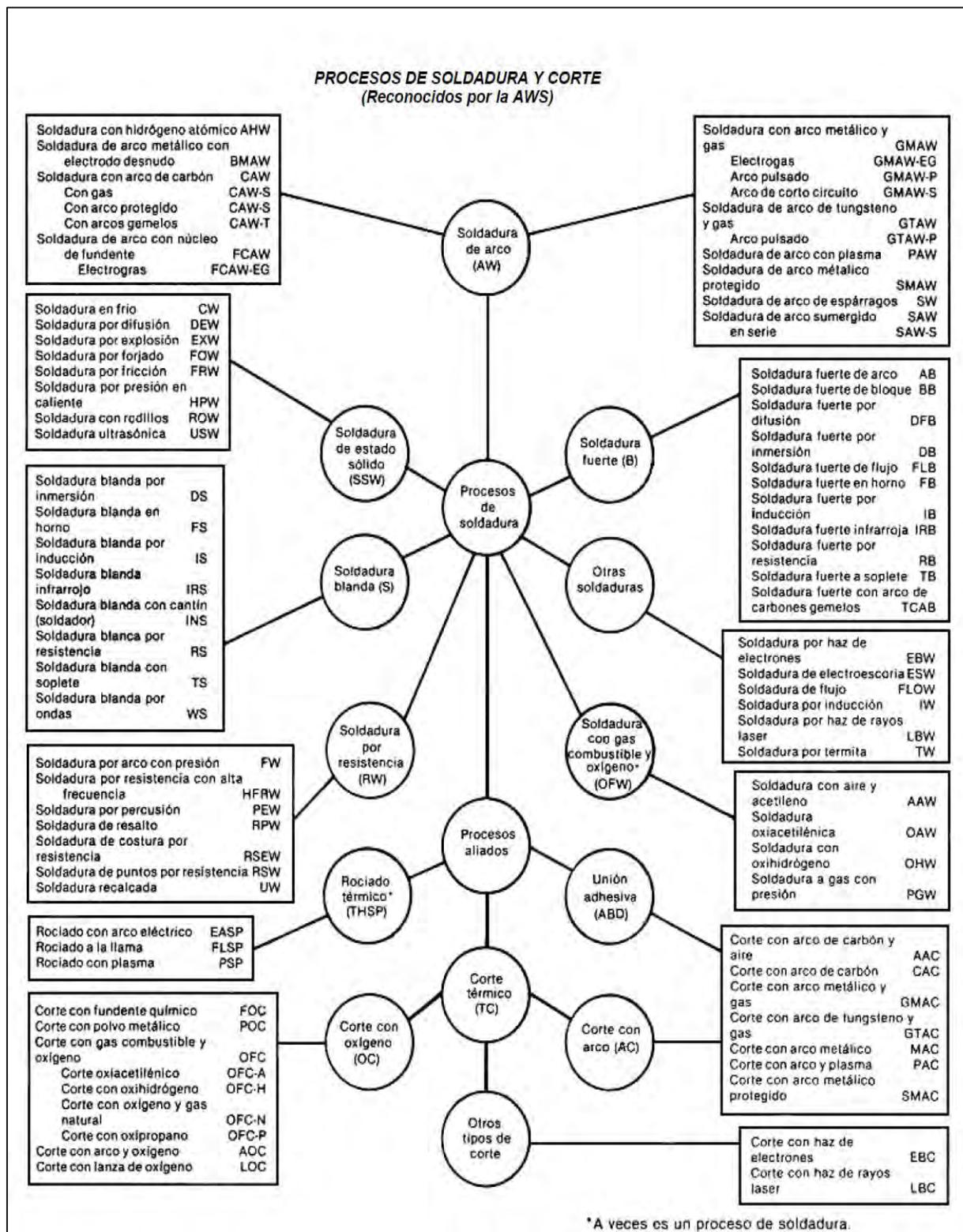
- Trituradoras, cazos y segmentos de refuerzo
- Máquinas de movimiento de tierras.
- Plataformas y estructuras base.
- Maquinaria para manejo de materiales y desechos, tanques y transportadores.
- Silos, tolvas, cribas y hormigoneras, alimentadores.
- Remolques y contenedores.
- Piezas de desgaste en minería.
- Excavadoras y cargadoras.

2.3. Procesos de Soldadura

En la figura 1 se muestra una clasificación general de los procesos de soldadura.

Figura 1

Esquema principal de procesos de soldadura



Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

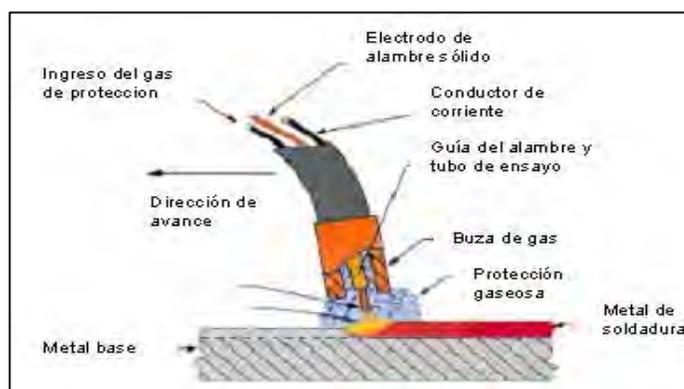
2.3.1. Soldadura por Arco con Alambre y Protección Gaseosa (GMAW)

Una característica importante para GMAW es que toda la protección para la soldadura es provista por una atmósfera de gas protector que también es suministrado a través de la pistola de soldadura desde alguna fuente externa, tal como se observa en la figura 2.

Los gases usados incluyen los del tipo inerte (argón y helio) puede usarse uno sólo o en combinación, o mezclado con otros gases reactivos como el oxígeno o el dióxido de carbono. Los electrodos usados en este proceso son alambres sólidos que se proveen en bobinas o rollos de distintos tamaños. (Society, 2012)

Figura 2

Soldadura por arco con alambre y protección gaseosa



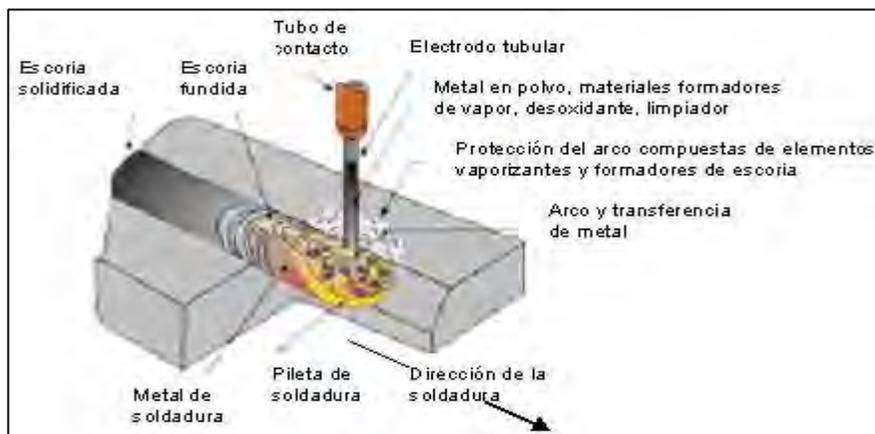
Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico:

Prentice – Hall Hispanoamerica S.A.

2.3.2. Soldadura por Arco con Alambre Tubular (FCAW)

Este proceso es similar a la soldadura por arco con alambre y protección gaseosa excepto que el electrodo es tubular y contiene un fundente granular en vez de un alambre sólido.

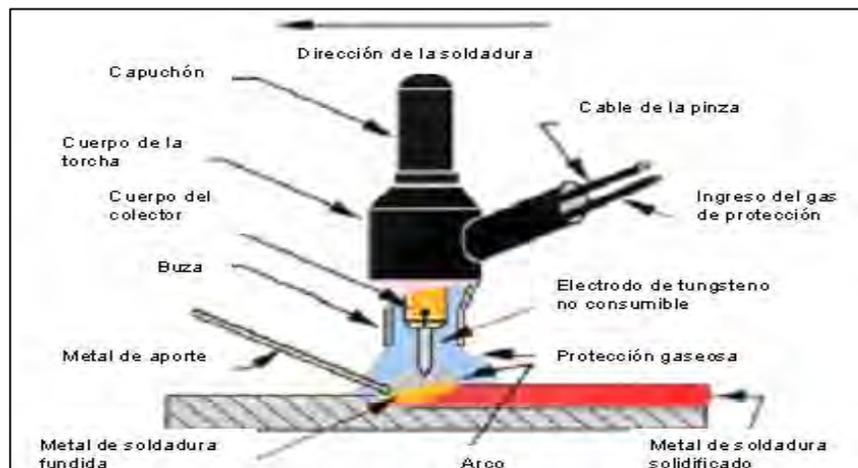
La diferencia puede notarse en la Figura 3 que muestra un conjunto soldado mediante un proceso FCAW auto protegido y una vista en detalle de la región del arco durante la soldadura. (Society, 2012)

Figura 3*Soldadura por arco con alambre tubular autoprotegida*

Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

2.3.3. Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno y Protección Gaseosa (GTAW)

La soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW), utiliza como fuente de energía un arco eléctrico que se establece entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza a soldar. El proceso emplea gas protector inerte que protege el baño de fusión. La adición de metal de aporte es opcional. La Figura 4, muestra los elementos básicos del proceso. (Society, 2012)

Figura 4*Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa*

Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

2.3.4. Soldadura por Arco Sumergido (SAW)

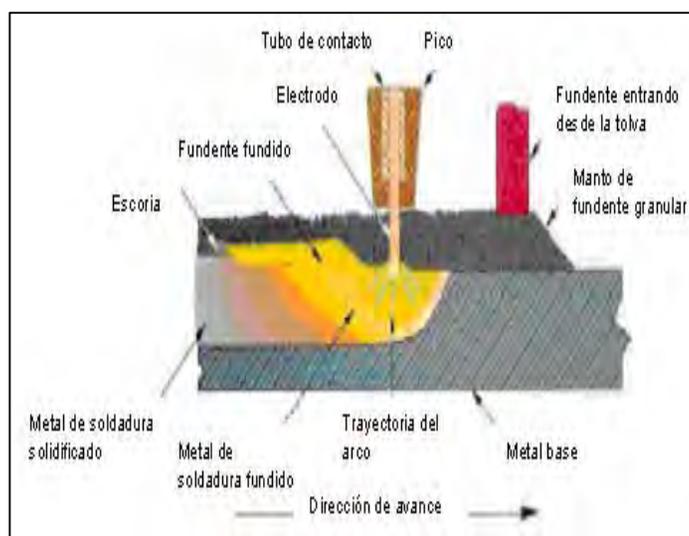
La soldadura por arco sumergido (SAW) consiste en la fusión de un alambre continuo y desnudo, donde el fundente es suministrado a través de una manguera que protege el arco y baño de fusión.

El arco eléctrico se establece entre el electrodo y metal de trabajo. No se aplica presión, y el metal de aporte se obtiene del electrodo y en ocasiones del suministro complementario como una varilla para soldar o gránulos metálicos.

La Figura 5 muestra cómo se produce una soldadura usando dicho proceso. (Society, 2012)

Figura 5

Soldadura por arco sumergido



Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

2.3.5. Soldadura por Arco de Plasma (PAW)

La soldadura por arco de plasma (PAW), es un proceso de soldadura especial, donde un arco de plasma controlado se dirige hacia el área de la soldadura. El proceso PAW utiliza un

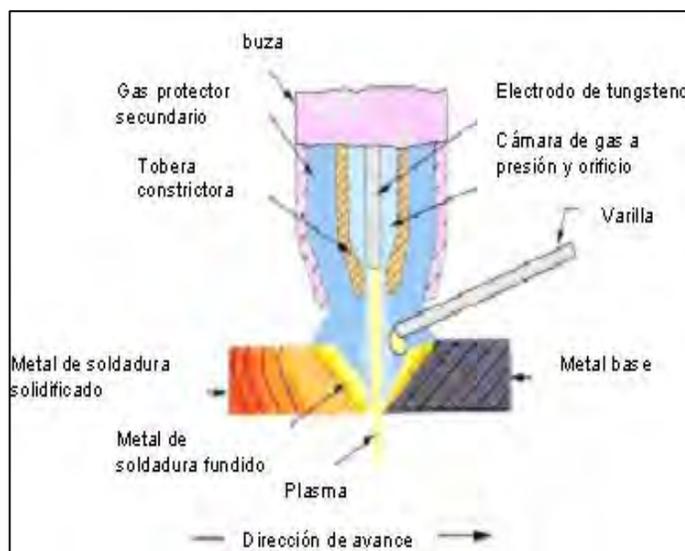
electrodo de tungsteno y la protección generalmente se obtiene del gas caliente ionizado que sale del soplete, en la cual se forma una corriente de arco de plasma de elevada temperatura a alta velocidad.

El gas protector puede ser un solo gas inerte o una mezcla de gases inertes (por ejemplo, argón o mezcla de argón e hidrógeno). (Society, 2012)

En la Figura 6 se muestra una la soldadura por arco de plasma.

Figura 6

Soldadura por arco de plasma



Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

2.3.6. Soldadura por Electroescoria (ESW)

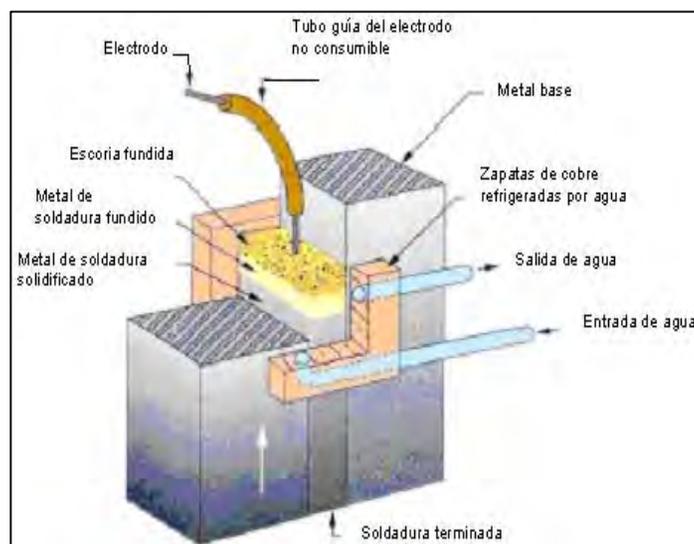
El soldeo por electroescoria está clasificado dentro de los procesos que utilizan el efecto Joule como mecanismo para producir la fusión del material base y del material de aporte. Este proceso utiliza escorias conductoras con la finalidad de generar calor suficiente para producir la fusión de los metales, y a su vez proteger al metal fundido del contacto directo con la atmosfera cuando son atravesados por la corriente de soldeo.

El proceso de soldadura comienza estableciendo un arco entre el alambre y la placa de metal base, dicho proceso utiliza un equipo similar al utilizado con el proceso de soldadura por arco sumergido. (Society, 2012)

En la figura 7 se observa el esquema del proceso de electroescoria.

Figura 7

Esquema de la soldadura por electroescoria



Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

2.3.7. Soldadura con Gas Oxidcombustible (OFW)

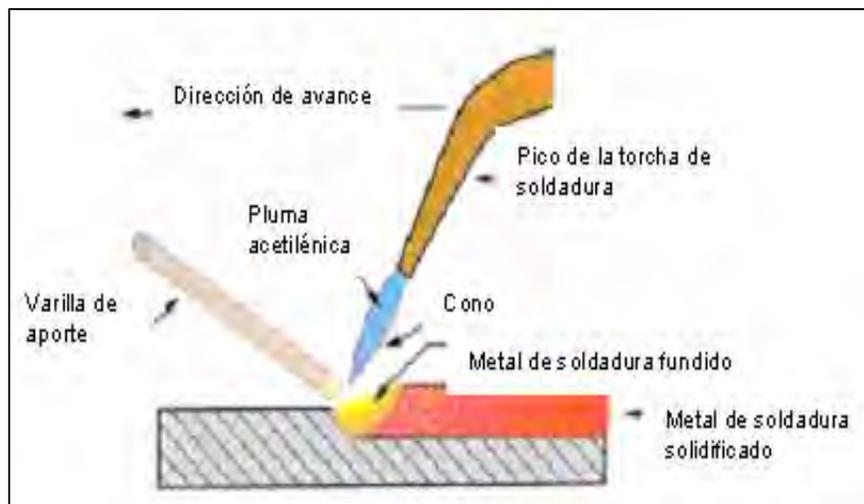
La soldadura con gas oxidcombustible es un proceso de soldeo por fusión en el que la fuente de energía calorífica utilizada para fundir, tanto el metal base como el material de aporte, es el calor generado por la reacción química, denominada combustión. La combustión ocurre entre un gas combustible (acetileno, propano o gas natural) y comburente (oxígeno).

La reacción de combustión es fuertemente exotérmica y forma una llama de elevada temperatura que se dirige, mediante un soplete, a los bordes de las piezas a unir, provocando su fusión y soldadura del metal base y material de aporte. (Society, 2012)

La Figura 8 ilustra el proceso OFW, utilizando el acetileno como gas combustible, siendo aplicado el metal de aporte externamente.

Figura 8

Soldadura oxiacetilénica



Fuente: Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

2.3.8. Soldadura de Espárragos (SW)

La soldadura de espárragos es un proceso especializado para unir pernos o componentes similares, se considera como un proceso de soldadura en la cual el arco se produce entre el espárrago y el metal base, que une entre si ambas piezas por fusión.

La soldadura se realiza muy fácilmente y en forma repetida, en la cual el espárrago se sujeta en una pistola de soldadura especial colocándola de forma correcta en contra de la parte de trabajo base, donde se unirá el espárrago y se jala el gatillo. (Society, 2009)

2.3.9. Soldadura con Rayo Láser (LBW)

La soldadura con láser es un proceso de unión por fusión en la cual se obtiene la coalescencia mediante la energía de un haz luminoso altamente concentrado y enfocado a la unión

que se va a soldar. La palabra laser es un acrónimo de “amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación”. El término coherente significa que todas las ondas de luz están en fase. (Society, 2012)

2.3.10. Soldadura por Haz de Electrones (EBW)

La soldadura con haz de electrones es un proceso de unión por fusión que produce la coalescencia de materiales gracias al calor obtenido por un haz incidente compuesto principalmente por electrones de alta energía en la unión por soldar. Los electrones son partículas fundamentales de la materia, caracterizados por su carga negativa y una masa muy pequeña. Para la soldadura con haz de electrones se elevan hasta un estado de alta energía teniendo aceleraciones a velocidades en el intervalo de 30 a 70 % de la velocidad de la luz. (Society, 2012)

2.4. Soldadura por Arco de Metal Protegido (SMAW)

Es el proceso más extendido entre todos los procedimientos de soldadura por arco, debido fundamentalmente a su versatilidad. El proceso por arco con electrodo revestido se aplica en todas las posiciones de soldadura, en locales cerrados y abiertos, es empleada en lugares relativamente alejados de la unidad generadora.

Este proceso es aplicable a casi todos los tipos de aceros: al carbono, débilmente aleados, inoxidable, resistentes al calor, etc., y a gran número de aleaciones, como el cobre-cinc (latones) y el cobre-estaño (bronces) principalmente.

No obstante, factores como la productividad y la mayor uniformidad de las soldaduras obtenidas para determinadas aplicaciones, hace que otros procedimientos vayan desplazando a este proceso. Al soldeo por arco con electrodo revestido también se le conoce por las siguientes denominaciones:

- SMAW, Shielded Metal Arc Welding (ANSI / AWS A3.0)
- 111, Soldeo metálico por arco con electrodo revestido (UNE – EN ISO 4063)
- MMAW, Manual Metal Arc Welding (Reino Unido)

2.4.1. Definición y Descripción General

El soldeo por arco con electrodo revestido es un proceso en el que la fusión se produce por medio del calor generado por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo revestido y la superficie del metal base a soldar.

El núcleo del electrodo consiste de una varilla de metal sólido, de material estirado recubierta con revestimiento. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales del recubrimiento o revestimiento del electrodo es estabilizar el arco y proteger el metal fundido, de la atmósfera, por medio de los gases que se generan cuando el recubrimiento o revestimiento se descompone por el calor generado por el arco. (Society, 2012)

La protección gaseosa producida por el recubrimiento del núcleo, controla en gran medida las propiedades mecánicas, la composición química y su microestructura del metal depositado. La composición del recubrimiento del electrodo varía para cada tipo de electrodo.

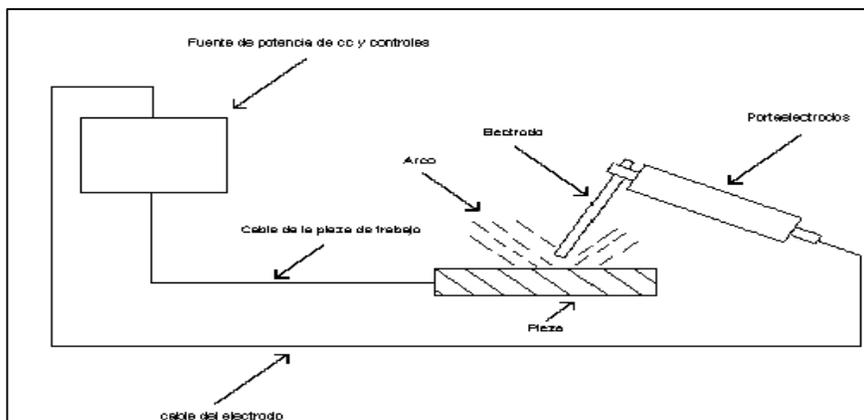
2.4.2. Principio de Funcionamiento

La soldadura por arco de metal protegido, aprovecha el calor del arco para fundir el metal base y la punta de un electrodo consumible recubierto. El electrodo y el metal base forman parte de un circuito eléctrico que se ilustra en la figura 9. Este circuito comienza en la fuente de potencia eléctrica e incluye los cables de soldadura, un portaelectrodo, una conexión con la pieza de trabajo

y un electrodo recubierto. Uno de los dos cables de la fuente de poder se conecta a la pieza de trabajo, el otro se conecta al portaelectrodo.

Figura 9

Elementos de circuito típico para soldadura por arco de metal protegido

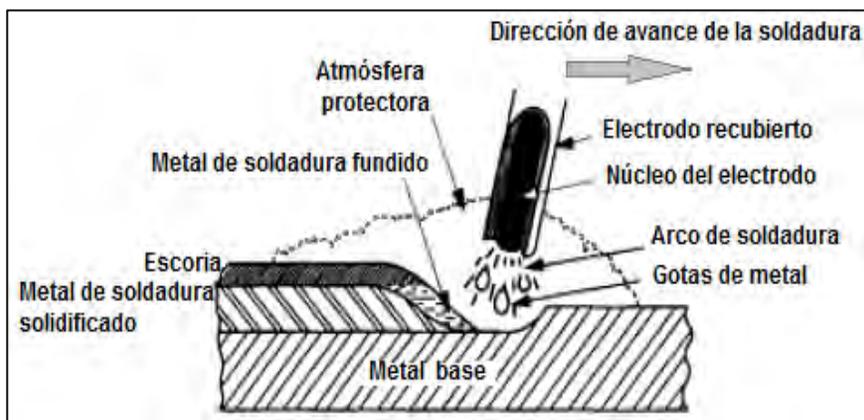


Fuente: Cabrera Sandoval H.L, 2005

El proceso de soldadura se inicia cuando se enciende un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo. El intenso calor producido por el arco funde la punta del electrodo y la superficie de la pieza de trabajo. En el extremo o punta del electrodo se forman de inmediato pequeños glóbulos de metal fundido, los cuales se transfieren a través de pequeñas gotas de metal de aportación. El esquema de este proceso se puede observar en la figura 10.

Figura 10

Soldadura por arco con electrodo revestido



Fuente: Cabrera Sandoval H.L, 2005

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para fundir el metal de aporte y el metal base. La temperatura alcanzada está por encima de la temperatura de fusión del metal (por encima de 5000 °C). (Cabrera Sandoval H.L, 2005)

2.4.3. Ventajas y Limitaciones del Proceso

La soldadura por arco de metal protegido es uno de los procesos más ampliamente utilizados, sobre todo para soldaduras cortas en trabajos de producción, mantenimiento y reparación, y para construcción en el campo.

Ventajas

- El equipo de soldeo es relativamente sencillo, no muy caro y portátil.
- El metal de aportación y los medios para su protección durante el soldeo proceden del propio electrodo revestido. No es necesaria protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.
- Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante, el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.
- 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.
- Es aplicable para una gran variedad de espesores, en general mayores de 2 mm.
- Es aplicable a la mayoría de los metales y sus aleaciones. (American Welding Society. (2008))

Limitaciones

- 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 metales de bajo punto de fusión como plomo, estaño y cinc, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos. Tampoco es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el titanio, zirconio, tántalo y niobio, ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.
- No es aplicable a espesores inferiores 2 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 5 cm), 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, el proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm. (American Welding Society. (2008))

2.4.4. Características del Arco

Se define el arco como una descarga eléctrica, a través de un gas ionizado llamado plasma, entre un electrodo y la pieza. Si el arco se mantiene, se produce el paso de una corriente eléctrica

a través del mismo, con desprendimiento de una gran cantidad de energía, en forma de calor y de radiación electromagnética. El calor, como se ha citado anteriormente, produce una temperatura elevada y origina la fusión del electrodo y de la pieza en contacto con el arco.

El arco está formado por dos zonas concéntricas, la interior llamada plasma y la exterior, llama. La primera de ellas realiza el transporte de la corriente y está formada por los siguientes componentes:

- Los electrones, que son los portadores de la mayor parte de la corriente, desplazándose del polo negativo (cátodo) al positivo (ánodo).
- Iones metálicos, que se desplazan en sentido contrario.
- Metales fundidos, en su mayor parte, procedentes del electrodo.
- Escorias.
- Vapores metálicos y no metálicos.
- Moléculas y átomos gaseosos, algunos de ellos ionizados.

Los iones metálicos y los átomos ionizados transportan otra parte de la corriente, a través del arco.

Los electrones e iones negativos son fuertemente acelerados por el campo eléctrico establecido entre el cátodo y el ánodo y chocan violentamente contra éste, transformando su energía cinética en calor, mientras que los iones metálicos lo hacen en sentido contrario, chocando contra el cátodo y produciendo también la elevación de su temperatura. Además, en el interior del plasma se producen también colisiones entre las partículas que viajan en sentidos contrarios, lo que, a su vez, contribuye a la gran emisión de energía calorífica y a la radiación de gran intensidad.

El calor desprendido es una manifestación de la gran energía cinética que tienen las partículas en su desplazamiento en el interior del plasma, el cual se acrecienta por efecto de la corriente y el potencial a través del arco. El calor se genera al frenarse la partícula por efecto de la colisión o del impacto, por lo que pueden apreciarse tres áreas de generación del calor según predominen unas u otras causas del frenado: cátodo, plasma y ánodo. En la primera, es el impacto de los iones positivos, aunque también contribuye de alguna manera el hecho de que, en la emisión de electrones, el fenómeno vaya acompañado de un cierto desprendimiento de calor. En la segunda, son las colisiones entre electrones, iones, átomos y otras partículas, las que producen la gran emisión de calor. En la última, es el impacto de los electrones, animados de una gran velocidad, lo que transforma su elevada energía cinética en calor.

La zona exterior del arco, o llama, es más fría que el plasma, y está generalmente formada por átomos generados por las moléculas gaseosas que, o bien al estar en contacto con la superficie de la columna de plasma se disocian, o bien se desprenden de la misma, ya disociados, y que en la llama se vuelven a recombinar formando moléculas y liberando la energía absorbida para su disociación, en forma de calor.

Todo ello caracteriza el arco eléctrico como una fuente de alto poder calorífico, que puede ser fácilmente controlada mediante una adecuada regulación de los parámetros eléctricos — tensión e intensidad — que incide en una zona relativamente muy pequeña de la pieza a soldar y cuyo desplazamiento se regula a voluntad del operador.

La tensión utilizada es baja, entre los 15 y 45 voltios, debido a que la longitud del arco es función directa de ésta, de forma que al aumentar la tensión aumenta también la longitud del arco y viceversa, por lo que con valores mayores de la tensión la longitud del arco haría impracticable el control de su direccionamiento y desplazamiento, particularmente en las uniones en ángulo. Por

otra parte, el alargamiento del arco facilita la salida de los portadores de carga a través de la superficie de la columna de plasma hacia las zonas más frías de la llama, con lo que desciende la temperatura global del arco y el mantenimiento del nivel de portadores de carga exige un aumento del potencial. La intensidad de la corriente, en cambio, se trata de que sea alta, entre los 50 y 550 amperios, ya que cuanto mayor sea, tanto más aumenta el número de electrones por unidad de tiempo y, en consecuencia, la energía de choque contra el ánodo y, por tanto, es el calor generado, lo que produce un aumento de la ionización térmica y la emisión electrónica inducida térmicamente en el cátodo, y una mayor fusión por unidad de tiempo del metal del electrodo, por tanto, se obtiene un mayor rendimiento.

Otro efecto de la intensidad de la corriente eléctrica es la fuerza de arrastre, proporcional al cuadrado de aquélla, que produce el movimiento del chorro de gases de la columna de plasma. La circulación del gas provoca, en la zona de la raíz del arco, una depresión que ayuda a desprender, desde la superficie fundida del extremo del electrodo, las gotas que el propio chorro de gases transporta y proyecta sobre el baño fundido en la pieza.

La geometría del arco responde a la relación de tamaños entre el extremo del electrodo y la pieza, siendo la forma del mismo sensiblemente cónica.

2.4.5. Variables de Soldeo del Proceso SMAW

a) Diámetro del electrodo

Se debe seleccionar el mayor diámetro posible que asegure los requisitos de aporte térmico y que permita su fácil utilización, en función de la posición, el espesor del material y el tipo de unión, que son los parámetros de los que depende la selección del diámetro del electrodo.

Los electrodos de mayor diámetro se seleccionan para el soldeo de materiales de gran espesor y para el soldeo en posición plana, debido a sus altas tasas de deposición.

En el soldeo en posición cornisa, vertical y bajo techo el baño de fusión tiende a caer por efecto de la gravedad, este efecto es tanto más acusado, y tanto más difícil de mantener el baño en su sitio, cuanto mayor es el volumen de éste, es decir cuanto mayor es el diámetro del electrodo, por lo que en estas posiciones convendrá utilizar electrodos de menor diámetro.

Asimismo, en el soldeo con pasadas múltiples el cordón de raíz conviene efectuarlo con un electrodo de pequeño diámetro, para conseguir el mayor acercamiento posible del arco al fondo de la unión y asegurar una buena penetración, se utilizarán electrodos de mayor diámetro para completar la unión.

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.

Por tanto, 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. (*Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I*)

b) Intensidad de corriente

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. (*Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I*)

c) Longitud de arco

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. Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros).

Según se va aumentando la velocidad de soldeo, el cordón se va haciendo más estrecho y va aumentando la penetración hasta un cierto punto a partir del cual aumentos en la velocidad traen como consecuencia una disminución de la penetración, debido a que el calor introducido no es suficiente para conseguir una mayor penetración. 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. Esto último también afecta a la dilución, y cuando deseamos que esta sea baja, como por ejemplo durante el recargue por electrodo revestido, la velocidad debe ser baja. Así mismo, recordar que la velocidad de soldeo afecta al calor suministrando a la unión por medio de velocidad de enfriamiento y por lo tanto a su

estructura metalúrgica final y como consecuencia directa a sus propiedades mecánicas finales (carga, rotura, impacto y durezas). (*Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I*)

d) Velocidad de desplazamiento

La velocidad de desplazamiento o de recorrido, es la rapidez con que el electrodo se desplaza a lo largo de la unión. La velocidad de recorrido adecuada es aquella que produce una franja de soldadura con el perfil y el aspecto correctos. Son varios los factores que determinan cual debe ser la velocidad correcta. Entre estos factores podemos indicar los siguientes:

- Tipo de corriente de soldadura, amperaje y polaridad.
- Posición de soldadura.
- Rapidez de fusión del electrodo.
- Espesor del material.
- Condición de la superficie del metal base.
- Tipo de unión.
- Embonamiento de la unión.
- Manipulación del electrodo.

Al soldar, la velocidad de recorrido debe ajustarse de modo que el arco vaya un poco adelante del charco de la soldadura.

Un incremento de la velocidad de recorrido reduce la penetración, causa un deterioro de la superficie de la franja y producir un socavamiento en los bordes de la soldadura. Una velocidad de recorrido baja, la franja de soldadura será ancha y convexa, con poca penetración. (*Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I*)

e) Tipo de corriente

El soldeo por arco con electrodos revestidos se puede realizar tanto con corriente alterna como con corriente continua, la elección dependerá del tipo de fuente de energía disponible, del electrodo a utilizar y del material base. El tipo de corriente de soldadura, la polaridad y los constituyentes de la cobertura del electrodo afectan la rapidez de fusión de todos los electrodos revestidos. Para un electrodo determinado, la rapidez de fusión se relaciona directamente con la energía eléctrica suministrada al arco. Parte de esta energía se destina a fundir una porción del metal base, y otra parte sirve para fundir el electrodo. *(Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I)*

Se distinguen dos tipos de corriente:

a) Corriente continua (CC)

La corriente continua, CC, es aquella que mantiene la misma polaridad a lo largo del tiempo, esto es, mantiene el mismo sentido de movimiento de las cargas eléctricas.

Un caso particular de corriente continua es la corriente continua uniforme que es constante en el tiempo, siendo la tensión y la intensidad invariables mientras el generador de corriente continua esté operativo. Se puede representar como una línea recta en el transcurso del tiempo. Así, en un conductor eléctrico, los electrones fluyen en una sola dirección en todo el circuito. *(Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I)*

En la corriente continua es necesario tener presente la polaridad, cuyos efectos son importantes en el funcionamiento de algunos circuitos electrónicos, y también en el

comportamiento del arco eléctrico. (*Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I*)

b) Corriente alterna (CA)

Las tensiones e intensidades de las corrientes que circulan por los circuitos de corriente variable no son estacionarias, sino que cambian con el tiempo.

La más sencilla de las corrientes variables con el tiempo, cambia periódicamente su sentido y recibe el nombre de corriente alterna (CA). La mayoría de los conceptos desarrollados anteriormente para las corrientes continuas puede trasladarse a los circuitos de CA. (*Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I*)

En la Tabla 3, se muestra una comparación entre corriente continua y corriente alterna.

Tabla 3

Comparación entre Corriente continua y Corriente alterna

Parámetros	Corriente Continua	Corriente Alterna
Soldeo a gran distancia de la fuente de energía. Soldeo con electrodos de pequeño diámetro que requieren bajas intensidades de soldeo	La operación resulta más fácil	Preferible Si no actúa con gran precaución se puede deteriorar el material debido a la dificultad de encendido de arco
Cebado de arco	Resulta más fácil	Más difícil en especial cuando se emplean electrodos de pequeño diámetro.
Mantenimiento de arco	Más fácil por la mayor estabilidad	Más difícil, excepto cuando se emplean electrodos de pequeño diámetro.
Soplo magnético	Puede resultar un problema en el soldeo de materiales ferromagnéticos.	No se presentan problemas.
Posiciones de soldeo	Se prefiere en el soldeo en posiciones vertical y bajo techo porque deben utilizarse intensidades bajas.	Si se utilizan los electrodos adecuados, se pueden realizar soldaduras en cualquier posición.
Tipo de electrodo	Se puede emplear con cualquier tipo de electrodo	No se puede utilizar con todos los electrodos. El revestimiento debe contener sustancias que reestablezcan el arco.
Espesor de la pinza	Se prefiere para espesores delgados.	Se prefieren para espesores gruesos ya que se pueden utilizar un electrodo de mayor diámetro y mayor intensidad, con la que se consiguen mayores rendimientos.

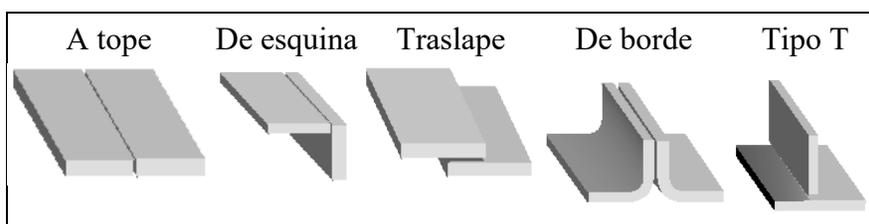
Fuente: (*Asociación española de soldadura y tecnologías de unión. Modulo I*)

2.5. Tipos de Juntas

Cuando las piezas de acero son llevadas a la forma de junta, ellas pueden asumir una de las cinco configuraciones presentadas en la Figura 11. Los tipos de juntas son las descripciones de posiciones relativas de los materiales que van a ser unidos y no implica un tipo específico de soldadura. (BF Mexico, 2022)

Figura 11

Tipos de juntas



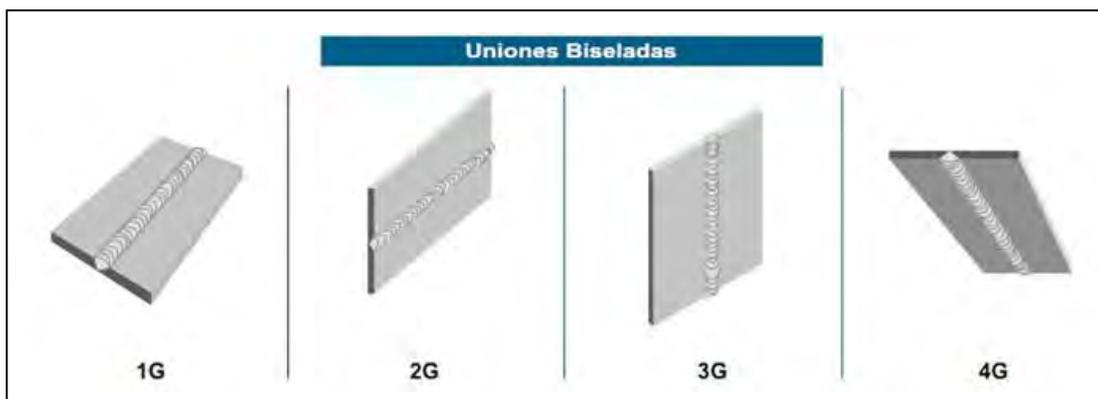
Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

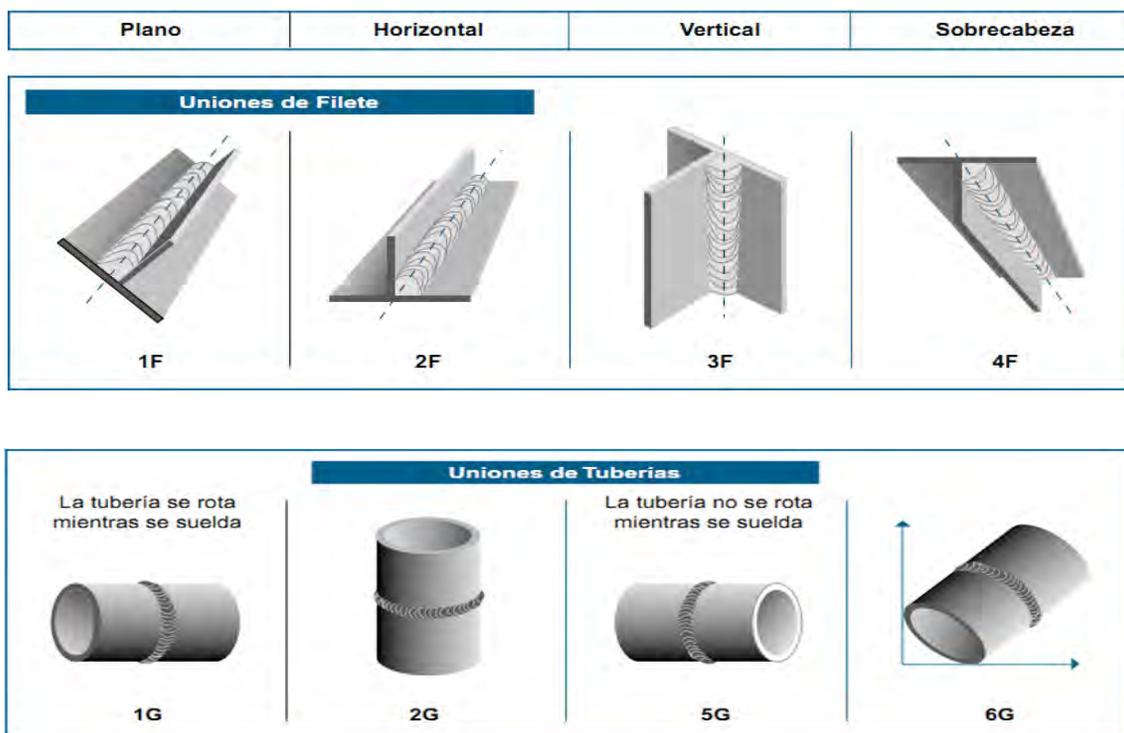
2.6. Posiciones de Soldadura

Según la designación ANSI/AWSA 3.0-8, las posiciones de soldaduras se indican en la Figura 12. (BF Mexico, 2022)

Figura 12

Posiciones de las soldaduras





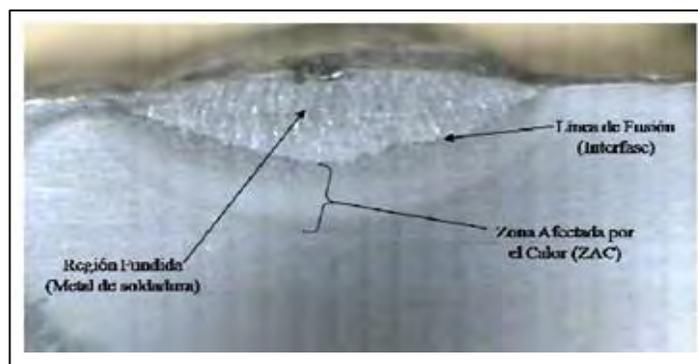
Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

2.7. Zonas Metalúrgicas de la Soldadura

En soldadura a medida que la fuente de calor interactúa con el material se puede identificar tres principales zonas, estas son: Zona de Fusión (ZF), también conocida como metal de aporte; Zona afectada por el Calor (ZAC); y Metal Base (MB), estas zonas se observan en la figura N° 13.

Figura 13

Zonas de la soldadura



Fuente: (fdocuments, 2020)

2.7.1. Zona de Fusión (ZF)

Consiste en una mezcla de metal de aporte y metal base que se ha fundido por completo. Esta zona se caracteriza por un alto grado de homogeneidad entre los componentes que se han fundido durante la soldadura. El principal motivo por el que se mezclan estos componentes es la convección que se suscita en el pozo de soldadura fundida. En la soldadura el molde se forma por medio de los moldes o superficies no fundidos de los componentes que se están soldando.

Es la interfaz entre la región fundida y la región en estado sólido, normalmente es la zona más propicia a inicio de fisuras, ya que existen áreas con fusión parcial.

2.7.2. Zona Afectada por el Calor (ZAC)

La zona afectada por el calor (también llamada HAZ) es el volumen de material en o cerca de la soldadura, cuyas propiedades han sido alteradas debido al calor de la soldadura. Debido a que el proceso de soldadura por resistencia se basa en calentar dos piezas, es inevitable que haya una HAZ. El material que se encuentra dentro de la HAZ sufre un cambio que puede o no resultar beneficioso para la unión soldada. La composición química en la ZAC es igual a la del metal base, pero en esta zona ha sido tratado con calor debido a las temperaturas de soldadura, por lo que se han alterado sus propiedades y estructura. La cantidad de daño metalúrgico en el haz depende de factores tales como la cantidad de calor que ha ingresado y la máxima temperatura alcanzada, la distancia de la zona de fusión, el intervalo de tiempo al que ha estado sujeto el metal a altas temperaturas, la velocidad de enfriamiento y las propiedades térmicas del metal. El efecto sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor por lo general es negativo y en esta región con frecuencia ocurren fallas en la junta soldada. Conforme aumenta la distancia de zona de fusión, se alcanza por fin la zona de metal base no afectada.

2.7.3. Metal Base (MB)

Es la región donde no ha ocurrido cambio metalúrgico, es decir no ocurre cambio microestructural, aunque el ciclo térmico impuesto por la soldadura puede producir tensiones residuales de contracción longitudinal y transversal.

2.8. Ciclo Térmico de la Soldadura

La microestructura de una aleación depende de su “historia térmica”, es decir de los calentamientos y enfriamientos a los que han sido sometidos previamente, Cuando se realiza una soldadura en una pieza. El ciclo térmico está representado básicamente por: (Fosca, 2003)

- La distribución de la temperatura máxima en la zona afectada por el calor (ZAC)
- La velocidad de enfriamiento en el metal fundido y en la ZAC
- La velocidad de solidificación del metal fundido

2.8.1. Importancia del Ciclo Térmico

Muchos de los metales y aleaciones que son expuestos al calor sufren cambios microestructurales, estos a su vez provocan cambios en sus propiedades mecánicas y afectan el comportamiento mecánico en servicio.

La permanencia a determinadas temperaturas y sus enfriamientos posteriores pueden alterar la microestructura de los aceros.

Sin embargo, cuando estos calentamientos y enfriamientos del metal no se realiza con la intención de mejorar sus propiedades mecánicas, sino que es consecuencia inevitable de algún otro proceso involucrado. También el calentamiento y enfriamiento locales trae como consecuencia

cambios dimensionales en la pieza, que pueden provocar distorsión o la formación de esfuerzos residuales en la pieza soldada. (Fosca, 2007)

2.8.2. Cambios de Temperatura Durante el Soldeo (Ciclo Térmico)

El metal adyacente a una soldadura está expuesto a ciclos térmicos rápidos, produciéndose en esta región diferentes y complejos cambios metalúrgicos. Teóricamente, si tanto los ciclos térmicos implicados como la respuesta del metal o aleación al ciclo térmico particular fueran conocidos, los cambios resultantes en la microestructura y propiedades mecánicas podrían predecirse. El estado actual de conocimientos apenas incluye información cuantitativa, tanto en relación con el ciclo térmico implicado como con los cambios metalúrgicos producidos en la zona afectada térmicamente por la soldadura. Sin embargo, existen acumulados datos considerables del efecto de las variables del arco de soldeo sobre la distribución de temperaturas en las proximidades de una soldadura; por ello, consideraremos aquí con algún detalle el proceso de soldeo por arco. Ciertas generalidades, aplicables cualitativamente a otros procesos de soldeo, serán también consideradas. (Fosca, 2007)

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

La distribución de temperaturas en el soldeo por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) está influenciada por los siguientes factores: (Fosca, 2007)

a) Aporte de calor (Heat input)

Es la energía que se genera durante la soldadura. Se calcula por la ecuación 1.

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \times f \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$H_{net} = \text{Calor neto suministrado (j/mm)}$

$I = \text{Intensidad de corriente (A)}$

$V = \text{Tensión eléctrica (V)}$

$v = \text{Velocidad de soldeo (mm/s)}$

$f: \text{Eficiencia térmica}$

Este aporte de calor está condicionado por la eficiencia del proceso de soldadura. En la tabla 4 se muestra las eficiencias térmicas para los diferentes procesos de soldadura.

Tabla 4

Eficiencias térmicas de diferentes procesos de soldadura

Proceso	F
SMAW	0.60-0.70
GMAW	0.70-0.85
TIG	0.60-0.65
SAW	0.90-0.95

Fuente: (Fosca, 2007)

b) Temperatura inicial de la chapa (o temperatura de precalentamiento)

Es la temperatura a la cual el metal ha de ser o no precalentado antes de soldar.

c) Geometría de la soldadura

La geometría de la soldadura se refiere al espesor de la pieza, la forma y dimensión del depósito de soldadura y el ángulo entre las piezas a unir. (Fosca, 2007)

d) Características térmicas del material

Este factor está relacionado con la conductividad térmica del material.

- Cuanto más baja sea la conductividad térmica, más pronunciada será la distribución de temperaturas máximas. En otras palabras, la zona afectada térmicamente será menor.
- Cuanta más alta sea la conductividad térmica del metal, más rápido se enfriará después de la soldadura.
- Cuanta más alta sea la conductividad térmica, más corto será el tiempo de exposición a elevada temperatura

e) Diámetro del electrodo

Para un diámetro mayor de electrodo se requerirá, mayor aporte de calor para fundirlo. Este factor es de importancia secundaria, pero influye en el tamaño de la fuente de calor.

Finalmente, se debe tener en cuenta que determinados rangos de temperatura provocan en el metal transformaciones microestructurales que afectan las propiedades mecánicas de la unión soldada.

Generalmente, para el caso de los aceros, los cambios metalúrgicos se producen tras la exposición a temperaturas entre la crítica inferior (723 °C) y la temperatura de fusión (1480°C). Cuando se realiza una soldadura, las regiones de la pieza que alcancen valores entre los límites arriba indicados, experimentarán cambios significativos en su microestructura y por lo tanto en las propiedades mecánicas. (Fosca, 2007)

2.9. Ecuación de la Temperatura Máxima en Cada Punto de la ZAC

La predicción, o interpretación, de las transformaciones metalúrgicas en un punto del metal sólido próximo a una soldadura, requiere algunos conocimientos acerca de cómo se alcanza el valor de temperatura máximo en un determinado lugar. Por ejemplo, en el soldeo a tope con

penetración completa y de una sola pasada realizada en chapa, la distribución de las temperaturas máximas, en el metal base adyacente a la soldadura, viene dada por la ecuación 2. (Fosca, 2007)

$$T_{max} = \frac{1}{\frac{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t \cdot Y}{H_{neto}} + \frac{1}{T_{fusion} - T_o}} + T_o \quad Ec. 2.$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x}$ = Temperatura máxima (°C) a una distancia Y (mm) del extremo o contorno del metal fundido

T_o = Temperatura inicial de la chapa (°C)

T_m = Temperatura de fusión (°C) (Temperatura del líquido del metal a soldar)

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

H_{net} = energía aportada neta (J/mm)

t = Espesor de la chapa a soldar (mm)

ρ = Densidad del material (g/mm³)

ρC = Calor específico volumétrico (J/mm³°C)

Y = Ancho de la zona afectada térmicamente (mm)

La ecuación del máximo de temperatura se puede utilizar con diferentes propósitos entre los que se encuentran:

- Calcular la temperatura máxima en puntos determinados de la ZAC
- Estimar el ancho de la ZAC
- Demostrar el efecto causado por el precalentamiento sobre el ancho de la ZAC

2.10. Cálculo del Ancho de la ZAC

Uno de los empleos 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. Sin embargo, para calcular la anchura con exactitud debe identificarse, 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 corresponder con algún cambio micro estructural o de las propiedades del material que se suelda.

La limitación más importante es que la ecuación sólo es aplicable a chapas delgadas en las cuales la conducción del calor se efectúa en direcciones paralelas al plano de la chapa. 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)

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_0} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_0} \right) \right] \times \left[\frac{H_{neto}}{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t} \right] \quad \text{Ec. 3}$$

2.11. Velocidad de Enfriamiento

Después que un punto del metal ha alcanzado su máximo de temperatura, la velocidad a la cual se enfría puede tener un significativo efecto sobre la microestructura metalúrgica y las propiedades mecánicas de la ZAC. Un acero altamente templable tiene una elevada tendencia a alcanzar transformación martensítica por acción de un enfriamiento rápido. Este acero al ser

soldado puede formar martensita en la ZAC durante el enfriamiento y provocar con ello la fragilidad del cordón y el riesgo a fisuración en frío. La unión soldada no debe admitir la presencia de constituyentes frágiles en su microestructura, (Fosca, 2007)

Después que un punto en el metal fundido o en sus proximidades ha alcanzado su máximo de temperatura, la velocidad a la cual se enfría puede tener un significativo efecto sobre la estructura metalúrgica y las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor (ZAC). La utilidad de calcular una velocidad de enfriamiento a partir de los parámetros de soldadura proviene del hecho de conocer que el enfriamiento provocará en el acero microestructuras frágiles como la martensita.

- **Ecuación de la velocidad de enfriamiento para las chapas gruesas y delgadas**

Cuando las chapas son relativamente gruesas, la velocidad de enfriamiento, viene dada por la ecuación 4.

$$R = \frac{2\pi K(T_c - T_o)^2}{H_{net}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

R = Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura (°C/s) en el momento justo en que el punto se está enfriando a la temperatura de interés T_c

k= Conductividad térmica del metal (J/mm, x s, x °C)

Si las chapas son relativamente delgadas, requiriendo menos de cuatro pasadas, se calcula mediante la ecuación 5.

$$R = 2\pi K\rho C \left[\frac{t}{H_{net}} \right]^2 \cdot (T_c - T_o)^3 \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

t = Espesor de la plancha, (mm)

ρ = Densidad del metal base (gr/mm³)

C = Calor específico del metal base (J/gr °C)

Algunas veces no es fácil determinar si la chapa es gruesa o delgada, debido a que estos términos no tienen un significado absoluto. Por esta razón, es útil definir una cantidad adimensional denominada "espesor relativo de la chapa"(r). Se calcula con la ecuación 6. (Fosca, 2007).

$$r = t \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_o)}{H_{net}}} \quad \text{Ec. 6}$$

2.12. Tiempo de Solidificación

La velocidad a la cual el metal fundido solidifica durante el soldeo, puede tener un efecto sobre su estructura metalúrgica, propiedades, facilidad de tratamiento térmico y contenido de impurezas. El tiempo de solidificación, St (segundos) del metal fundido depende del aporte térmico neto y viene dado por la ecuación 7. (Fosca, 2007).

$$St = \frac{L * H_{net}}{2\pi K \rho C (T_m - T_o)^2} \quad (\text{Ec. 7})$$

Dónde:

St = tiempo de solidificación, tiempo transcurrido desde el principio hasta el final de la solidificación en un punto determinado del metal fundido (s)

L = calor de fusión (J/mm³)

2.13. Carbono Equivalente

Una de las formas de predecir la soldabilidad de los aceros es a través de la medida de la dureza de las soldaduras en la zona afectada por el calor (ZAC). En las soldaduras, 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, corrosión bajo tensión, fragilidad por hidrogeno, etc. (Fosca, 2007)

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.

Existen varias fórmulas para calcular el carbono equivalente, una de las ecuaciones utilizadas es la ecuación 8:

$$CE = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad Ec. 8$$

Según el código de soldadura estructural ANSI/ AWS D1.1 el grado de soldabilidad de los aceros se puede determinar mediante el uso del diagrama de Graville, ver Figura 14. Además, se describen las características de comportamiento de tres zonas que a continuación son descritas:

Zona I: Aceros de bajo carbono y bajo endurecimiento no susceptibles a fisuras.

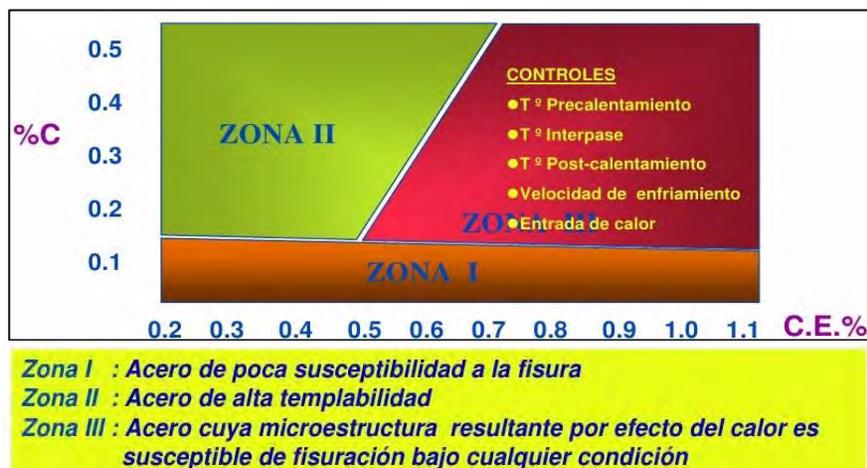
Zona II: Aceros con mayor porcentaje de Carbono y bajo endurecimiento, el riesgo a fisuras en la ZAC puede ser evitado mediante el control de la velocidad de enfriamiento, por medio del aporte térmico o en menor extensión el pre calentamiento.

Zona III: Aceros con elevado porcentaje de carbono y alto endurecimiento y en todas las condiciones de soldadura pueden producir micro estructuras susceptibles a fisuras.

Desde el punto de vista de selección de parámetros de soldadura este diagrama indicaría que si por su composición química un acero se ubica en la zona II su soldadura debe involucrar el uso de procesos de bajo hidrógeno y pre calentamiento, mientras que si un acero es ubicado en la Zona III se deben aplicar procesos de bajo hidrógeno, pre calentamiento y tratamientos térmicos post soldadura.

Figura 14

Diagrama de Graville para la clasificación de aceros



Fuente: Fosca, C. Metalurgia de la Soldadura (2007)

2.14. Ensayos no Destructivos y Destructivos

2.14.1. Ensayo no Destructivo

Vesselina Radeva (2014), denomina ensayo no destructivo (END), también llamado en ingles non destructive testing (NDT), a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere sus propiedades físicas, mecánicas, químicas o dimensionales.

Los ensayos no destructivos se clasifican en:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos Penetrantes (PT)
- Partículas Magnéticas (MT)
- Radiografía (RT)
- Ultrasonido (UT)

Para el presente trabajo solo se tomará en cuenta los ensayos siguientes: Inspección visual y líquidos penetrantes.

a) Inspección Visual

La inspección visual (ANSI/AWS, 2000) es un método no destructivo de valioso control del proceso mediante el cual una soldadura desde su fase de preparación hasta su puesta en servicio pueden evaluarse de acuerdo con unos requerimientos aplicables con miras de asegurar la calidad de la soldadura, esta evaluación puede ser llevada a cabo por: en primera instancia por soldadores, supervisores de soldadura, inspectores de soldadura por parte de los contratistas, inspectores de soldadura por parte de los propietarios, o inspectores reguladores. La inspección visual es desarrollada antes, durante y después de la soldadura y tiene en cuenta aspectos como:

- ✓ Conformidad con el procedimiento de soldadura especificado para la unión soldada
- ✓ Control en la preparación de la junta a soldar
- ✓ Verificación de condiciones operativas de: equipos de soldadura (calibrados y en buen estado), materiales de aporte y consumibles, gases, materiales base
- ✓ Calidad del cordón de soldadura de raíz
- ✓ Preparación de la raíz de la junta antes de soldar por el otro lado
- ✓ Temperatura de precalentamiento y entre pasadas

- ✓ Secuencia de pases de soldadura
- ✓ Calidad de los cordones de relleno y presentación de la soldadura
- ✓ Limpieza entre pasadas
- ✓ Apariencia, dimensionamiento final de la soldadura
- ✓ Distorsión y deformación generada en la soldadura
- ✓ Tratamiento post soldadura

b) Líquidos Penetrantes

Este ensayo se utiliza para detectar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales inspeccionados. Es uno de los END más ampliamente utilizados para la detección de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. Es, casi seguro, el método de END más comúnmente utilizado en la actualidad, porque se puede aplicar a cualquier material magnético o no magnético. Los líquidos penetrantes proporcionan a la industria una amplia gama de sensibilidades y técnicas que lo hacen adaptable a una gama de tamaños y formas. Es extremadamente útil para exámenes que se realizan en lugares remotos por su versatilidad. También es apropiado en entornos de producción de piezas pequeñas en período de tiempo relativamente corto. (Destructivos, 2009)

La característica distintiva principal entre los dos tipos es:

- Los líquidos penetrantes fluorescentes contienen un colorante que fluoresce bajo la luz negra o ultravioleta.
- Los líquidos penetrantes no fluorescentes contienen un colorante de alto contraste bajo luz blanca.

Ambos líquidos se aplican igual y constan de las siguientes fases:

- ✓ Limpieza inicial de la pieza
- ✓ Aplicación del líquido penetrante
- ✓ Medida del tiempo de penetración
- ✓ Eliminación del líquido sobrante
- ✓ Aplicación del líquido revelador
- ✓ Examen de la pieza
- ✓ Limpieza final de la pieza

➤ **Limpieza inicial de la pieza**

Las piezas a examinar han de estar limpias de sustancias extrañas como grasas, óxidos, aceites, escorias, pinturas, etc., para dicha limpieza se utilizan diferentes detergentes, disolventes, decapantes, etc. Una vez terminado el proceso de limpieza hay que dejar la pieza a examinar totalmente seca.

➤ **Aplicación del líquido penetrante**

El líquido penetrante se puede aplicar de tres maneras distintas, como pueden ser por inmersión en un baño, pulverizando el líquido sobre la pieza (spray) y extendiéndolo sobre la pieza con una brocha, usándose normalmente un pigmento rojo. El penetrante ideal para fines de inspección deberá reunir las siguientes características:

- Resistencia a la evaporación
- De fácil aplicación en la superficie
- Habilidad para penetrar orificios y aberturas muy pequeñas y estrechas
- Habilidad para permanecer en aberturas amplias

- Habilidad de mantener color o la fluorescencia
 - De difícil eliminación una vez dentro de la discontinuidad
 - Habilidad de extenderse en capas muy finas
 - De fácil absorción de la discontinuidad
 - Atóxico, incoloro, no corrosivo, anti inflamable, estable bajo condiciones de almacenamiento y de costo razonable
- **Medida del tiempo de penetración**

Hay que dejar el tiempo suficiente para que el líquido penetrante y se introduzca en las imperfecciones de la pieza a analizar, por lo que será muy importante controlar el tiempo, que viene especificado en los botes del producto.

➤ **Eliminación del líquido sobrante**

La limpieza de la pieza para eliminar el líquido sobrante se puede realizar de varias formas; por inmersión, por pulverización o por rociado de la pieza en un baño de líquido limpiador.

➤ **Aplicación del líquido revelador**

El líquido revelador que es normalmente blanco, es aplicado por inmersión, rociado o pulverizado, con mucho cuidado ya que son líquido muy volátiles. Una vez aplicado las zonas de la pieza que contengan restos de líquido penetrante, resaltaran a simple vista, siendo muy fácil su observación.

➤ **Examen de la pieza**

Las imperfecciones aparecen marcadas de forma clara y exacta a lo largo de la pieza a examinar, la observación se hará para los líquidos fluorescentes bajo lámparas de mercurio o tubos

de luz violeta y para los líquidos normales se hará bajo la luz natural apareciendo puntos rojos en las zonas con imperfecciones.

➤ **Limpieza final de la pieza**

Hay que eliminar todo tipo de resto de líquidos, ya sean penetrantes o reveladores, limpiándolos con disolventes, detergentes, etc.

2.14.2. Ensayos Destructivos

Vesselina Radeva (2014), define como aquellos ensayos que se realizan a un material mediante el uso de herramientas o máquinas las cuales producen una alteración irreversible de su composición química, mecánica o de su geometría dimensional.

Para el presente trabajo de investigación solo se tomará en cuenta el ensayo de dureza y dobléz.

a) Dureza

Vesselina Radeva (2014), define la dureza como la resistencia que opone un material a ser penetrado por un cuerpo más duro, y esta micro penetración se realiza mediante una punta.

Los ensayos de dureza más utilizados son:

- Ensayo Martens
- Ensayo Shore
- Ensayo Mohs
- Ensayo Brinell
- Ensayo Vickers
- Ensayo Rockwell
- Ensayo Poldi

- Ensayo Knoop (Vesselina Radeva - 2014)

Para el presente trabajo solo se tomará en cuenta el ensayo Rockwell B.

b) Dureza Rockwell

(El estándar ASTM E18-03), 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 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. Las escalas de dureza Rockwell, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Escalas de dureza Rockwell

Escala	Indentador	Carga Total	Color de escala	Aplicaciones
A	Cono diamante	60	Negro	Metales duros, superficies templadas, chapa fina (<0,4mm)
D	Cono diamante	100	Negro	Piezas con superficies templadas de dureza media, chapas.
C	Cono diamante	150	Negro	Aceros templados
F	Bola de Ø 1/16"	60	Rojo	Aleaciones cobre recocido. Chapa fina metálica (<0.6mm)
B	Bola de Ø 1/16"	100	Rojo	Aceros blancos, de construcción, metales no ferrosos
G	Bola de Ø 1/16"	150	Rojo	Bronce, cobre-berilio, cobre-níquel, función maleable
H	Bola de Ø 1/8"	60	Rojo	Aluminio, Zinc, plomo
E	Bola de Ø 1/8"	100	Rojo	Función, aleaciones Al-Mg, metales antifricción o sintéticos
K	Bola de Ø 1/8"	150	Rojo	
L	Bola de Ø 1/4"	60	Rojo	
M	Bola de Ø 1/4"	100	Rojo	Metales antifricción o de dureza muy baja, Ebonita
P	Bola de Ø 1/4"	150	Rojo	(ASTMD530-59T), Madera laminada (ASTM D 805-55),
R	Bola de Ø 1/2"	60	Rojo	Materiales sintéticos (ASTM D- 785-60T). Otros materiales
S	Bola de Ø 1/2"	100	Rojo	muy blandos o muy finos.
V	Bola de Ø 1/2"	150	Rojo	

Fuente: (ASTM E18-03, 2017)

c) Ensayo de Doblado

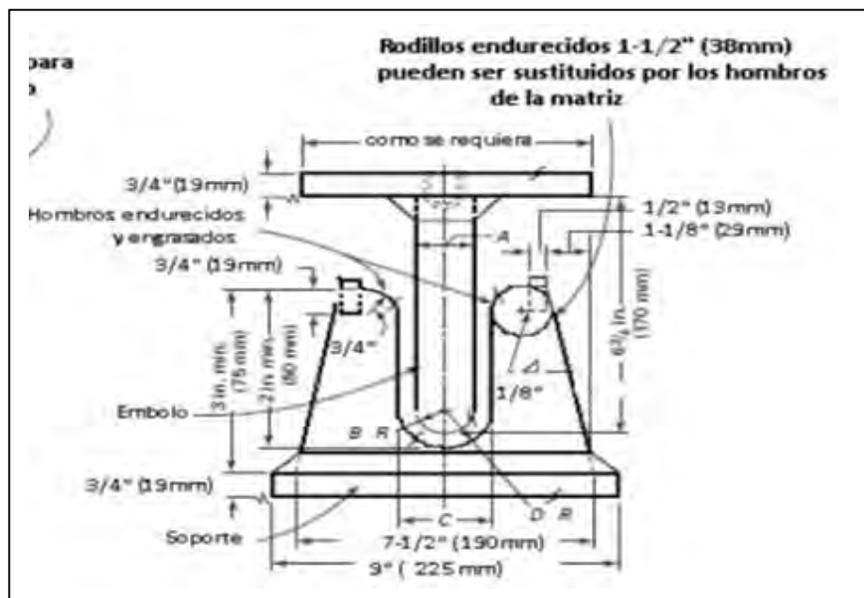
La finalidad de este ensayo es determinar la ductilidad y la calidad del material de la soldadura, se realiza mediante el doblado de la probeta en forma de u, para luego examinar la zona doblada, se utiliza este ensayo para calificar procedimiento, habilidad de soldadores y operadores de máquinas de soldar: Los ensayos de doblado 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 15 y 16, se puede observar la matriz de ensayo de doblado y el doblado de cara y raíz.

Figura 15

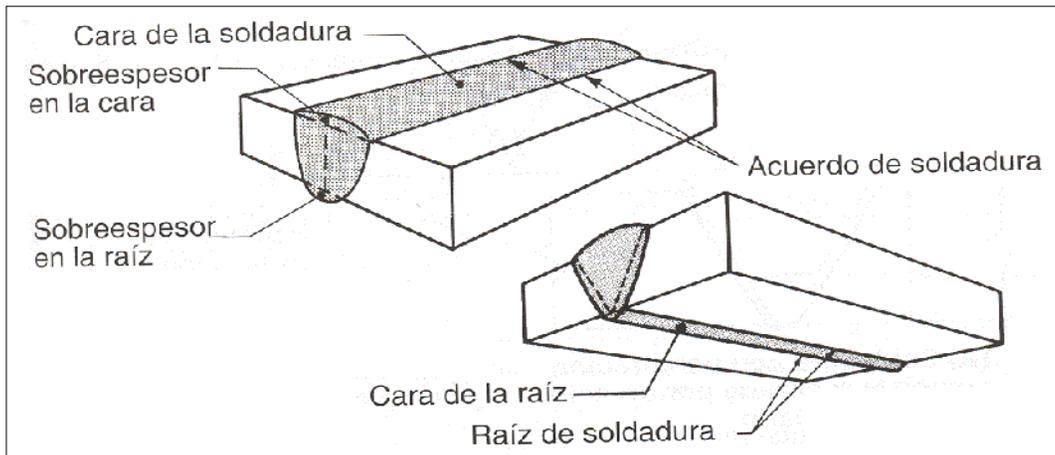
Matriz de ensayo de doblado



Fuente: ASME Sección IX 2015

Figura 16

Soldadura en cara y raíz



Fuente: ASME Sección IX 2015

Esta prueba de ensayo es cualitativa; se busca que las probetas de experimentación no presenten fisuras. Para la aceptación es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- Las discontinuidades medidas en cualquier dirección en la superficie no deben tener más de 3 mm.
- La suma de todas las discontinuidades presentes de entre 1 mm y 3 mm no deben sobrepasar los 10 mm en total.

2.15. Imperfecciones (Discontinuidades) en las Uniones Soldadas

(Echevarria, 2002) indica que las imperfecciones son anomalías o irregularidades que se presentan en la unión soldada. Se consideran como defecto cuando por su magnitud o localización puedan provocar el fallo de la unión. Las causas que pueden originar estas imperfecciones son entre otras, una inadecuada:

- Preparación, disposición o limpieza de las piezas a unir
- Ejecución de la soldadura

- Soldabilidad del metal base (Echevarria, 2002)

2.15.1. Clasificación de Discontinuidades

Una forma simple de clasificar las discontinuidades y defectos en soldadura es superficiales e internas. (Echevarria, 2002)

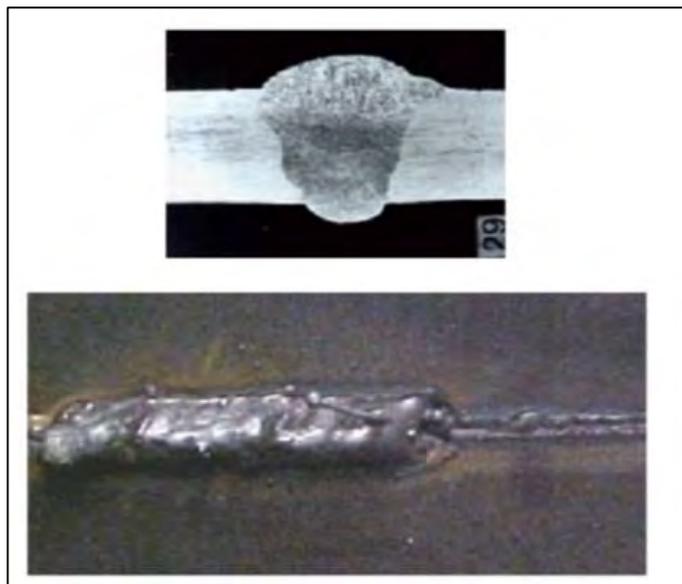
2.15.1.1. Discontinuidades Superficiales

- **Exceso de penetración**

Se produce por efecto de un movimiento que causa la penetración del electrodo dentro de los biseles, los cuales son distribuidos en esas áreas. Causa que el material chorree al interior y puede retener escoria o no en su interior. Figura 17 (Echevarria, 2002)

Figura 17

Exceso de penetración



Fuente: (Echevarria, 2002)

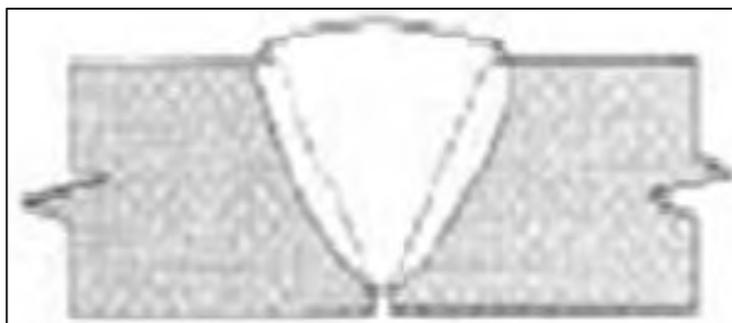
- **Falta de penetración**

Como en la unión en U o en V son visibles por la cara posterior, esta imperfección puede considerarse superficial. A menudo la raíz de la soldadura no quedará

adecuadamente rellena con metal dejando un vacío. Puede ser debida a una separación excesivamente pequeña de la raíz, a un electrodo demasiado grueso, a una corriente de soldadura insuficiente, a una velocidad excesiva de pasada, penetración incorrecta en la ranura. Este defecto por lo general no es aceptable y requiere la eliminación del cordón de soldadura anterior y repetición del proceso. Figura 18 (Echevarria, 2002)

Figura 18

Falta de penetración



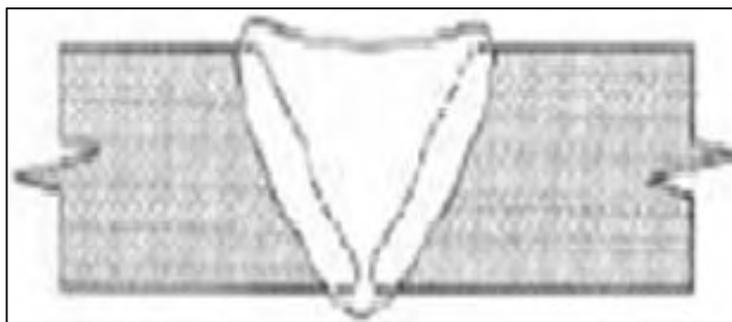
Fuente: (Echevarria, 2002)

- **Concavidades**

Concavidad externa o falta de relleno: presenta una disminución de refuerzo externo, por poco depósito de material de aporte en el relleno del cordón. Figura 19 (Echevarria, 2002)

Figura 19

Concavidades



Fuente: (Echevarria, 2002)

- **Socavaduras o mordeduras de borde**

La socavadura es una ranura fundida en el metal base, adyacente a la raíz de una soldadura o a la sobre monta, que no ha sido llenada por el metal de soldadura”. Figura 20 (Echevarria, 2002)

Causas y corrección

1. Exceso de calor - Corrija el amperaje de su maquina
2. Electrodo inadecuado - Cambie el electrodo
3. Manipulación incorrecta - Mejore el movimiento manual
4. Arco muy intenso - Corrija el arco
5. Velocidad inadecuada - Mejore la velocidad y corrija el movimiento del electrodo

(Echevarria, 2002)

Figura 20

Socavaduras o mordeduras de borde



Fuente: (Echevarria, 2002)

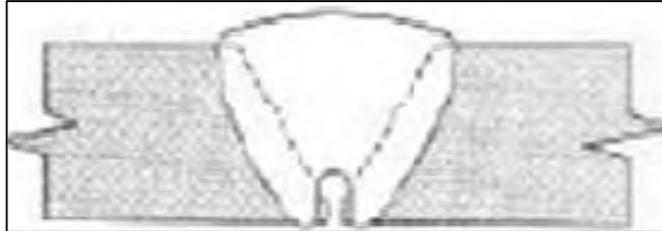
- **Quemado**

Es una zona de la pasada de raíz donde la penetración excesiva ha causado que el aporte de la soldadura penetre dentro de la misma sopládose. Figura 21. Resulta de factores que producen excesivo calor en un área determinada, tales como: excesiva

corriente, velocidad lenta del electrodo, manejo incorrecto del electrodo. Hay destrucción completa de los biseles. (Echevarria, 2002)

Figura 21

Quemado



Fuente: (Echevarria, 2002)

- **Salpicaduras**

Son imperfecciones consistentes en pequeñas esferitas de metal fundido depositadas aleatoriamente sobre el cordón y su alrededor. Pueden ser provocadas por humedad en el revestimiento del electrodo. Generalmente no tienen importancia respecto a la calidad de la soldadura. (Echevarria, 2002)

Figura 22

Salpicaduras



Fuente: (Echevarria, 2002)

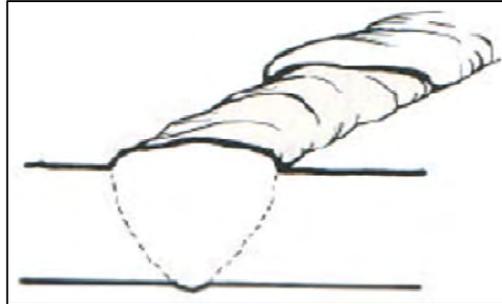
- **Falta de continuidad del cordón**

Se origina al interrumpir el soldador el cordón y no empalmar bien la reanudación del trabajo. Su severidad es muy variable ya que, en los casos más severos, pueden

considerarse auténticas faltas de fusión transversales, en tanto que, en otras ocasiones, son simples surcos normales al eje del cordón. (Echevarria, 2002)

Figura 23

Falta de continuidad del cordón



Fuente: (Echevarria, 2002)

- **Otros defectos:**

Erosiones y huellas: Son un grupo de defectos que tienen un origen mecánico de abrasión, deformación o arranque de material, pueden dividirse en:

Exceso de rebajado: Producido durante el mecanizado o esmerilado excesivo del cordón, quedándose éste ligeramente cóncavo. La apariencia radiográfica se muestra como áreas ligeramente más oscuras que el campo adyacente, con contornos difusos, difíciles de percibir y que siguen la trayectoria del cordón.

Huellas de esmerilado o burilado: Surcos en la superficie del metal base o del cordón, marcados por la muela o el buril manejados inhábilmente. Radiográficamente aparecen como sombras ligeramente oscuras, rectilíneas y paralelas.

Huellas de mecanizado: Erosiones producidas por herramientas que preparan la soldadura o por imperfecto mecanizado de la misma. La radiografía las muestra como líneas ligeramente oscuras, dibujadas nítidamente y paralelas.

Martillazos o golpes en general: Son deformaciones locales producidas por choques de objetos contra el metal base o contra el cordón. Radiográficamente los martillazos se señalan como arcos ligeramente oscuros, con un borde bien marcado, más denso, a partir del cual se difunde la mancha, como puntos, a manera de poros, etc.

Restos de electrodos: Cuando se suelda con equipos automáticos en atmósfera inerte y electrodo continuo, pueden quedar, al efectuar el cordón de penetración restos del alambre, electrodo que sobresalen, a veces, varios centímetros de la base de la unión soldada. En la radiografía, aparecen como unos palitos claros que parten del eje del cordón. (Echevarría, 2002)

2.15.1.2. Discontinuidades Internas

Estas discontinuidades se clasifican en:

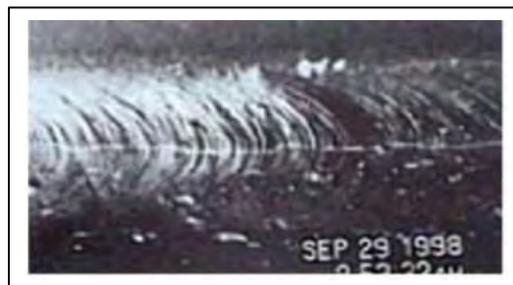
- **Fisuras longitudinales**

Pueden producirse en el centro del cordón (generalmente por movimientos durante o posteriores a la soldadura) y en la interfase del material base con el de aporte (por causa de un enfriamiento brusco o falta de un correcto precalentamiento en grandes espesores)

Figura 24. (Echevarria, 2002)

Figura 24

Fisuras longitudinales



Fuente: (Echevarria, 2002)

- **Fisuras transversales**

Producidas generalmente en aceros duros, por combinación de elementos que al enfriarse a la temperatura normal producen la fisura que puede o no prolongarse al metal base. Pueden ser:

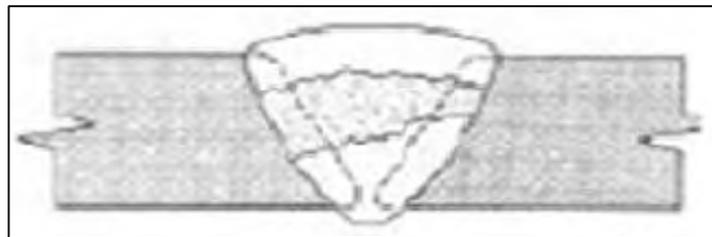
- **Fisuras en caliente:** Se producen durante la solidificación de la junta. Las causas principales de este defecto en acero al carbono no aleados o de baja aleación son:
 - Medio o alto contenido de carbono en el metal base
 - Alto porcentaje de impurezas fósforo y azufre en el metal base
 - Elevadas tensiones de contracción (depende de la mayor o menor plasticidad del material de la junta)

Las fisuras en caliente se pueden manifestar en todos los materiales metálicos, ferrosos y no ferrosos. Son intergranulares y pueden tener orientaciones diversas.

- **Fisuras en frío:** Se forman cuando el material se acerca o alcanza la temperatura ambiente. Figura 25

Figura 25

Fisuras en frío



Fuente: (Echevarria, 2002)

Causa:

- Principalmente, el elevado contenido de hidrógeno en la zona fundida

- Elevada velocidad de enfriamiento
- Tensiones producidas sobre el cordón por el enfriamiento
- En soldaduras de aceros dulces y aquellos de baja aleación con manganeso y microaleados

Las fisuras son muy pequeñas (llamadas fisuras de hidrógeno) y frecuentemente se reagrupan en un cierto número en la misma zona fundida de la junta.

En aceros de elevada resistencia como los bonificados, las fisuras son generalmente más grandes pudiendo atravesar todo el cordón en dirección transversal.

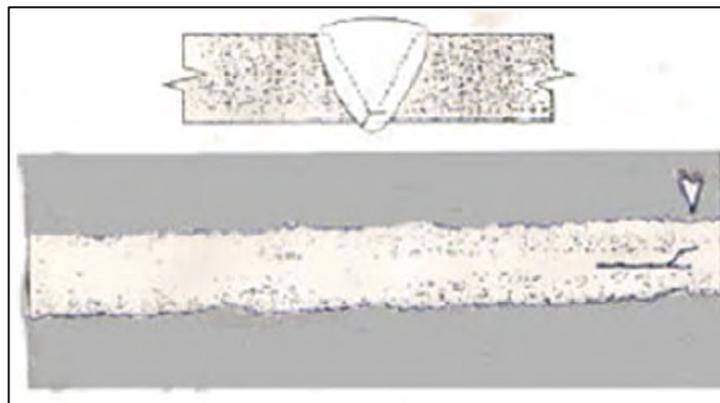
Se observa radiográficamente como una línea fina muy negra y recortada, de poca ondulación y transversal al cordón soldado. (Echevarria, 2002)

- **Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)**

En el arranque de la soldadura por cambio de electrodo pueden producirse fisuras en forma de estrella por efecto del brusco enfriamiento y recalentamiento del material (son fisuras en caliente). Figura 26

Figura 26

Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)



Fuente: (Echevarria, 2002)

Cuando se interrumpe el arco se forma un cráter de contracción si la cavidad del arco no se rellena con una cantidad de material fundido adecuado. Los cráteres de arco son frecuentemente los puntos defectuosos en la soldadura en razón a que el último material que se solidifica lo hace a tensiones muy elevadas, pudiendo producir segregación. Generalmente se observa radiográficamente como tres líneas finas concluyentes y la del sentido del cordón soldado mucho más larga. (Echevarria, 2002)

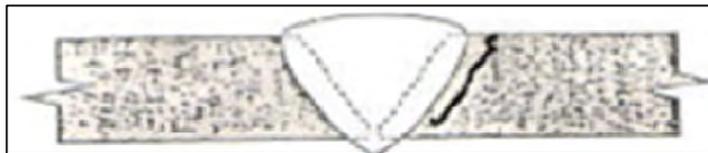
- ***Fisuras alrededor del cordón (ZAC)***

Fisuras en frío: Se produce por la falta de precalentamiento. En aceros duros (estructura martensítica en la ZAC como resultado del ciclo térmico de soldadura) o de mucho espesor.

Se presentan invariablemente en los granos más gruesos de la ZAC del acero. Esto se atribuye al efecto del hidrógeno disuelto liberado por el electrodo (humedad) o por el metal que solidifica, por lo que se puede evitar con precalentamiento y manteniendo el material soldado alrededor de 200°C un tiempo determinado, o por el uso de electrodos básicos.

También afectan las tensiones alcanzadas como resultado de la contracción de la junta o geometrías con entallas. Tienen generalmente una dirección longitudinal, Figura 27. Algunas veces pueden ser transversales, pueden ser internas (esto bajo el cordón de soldadura) o aflorar al lado del cordón.

La imagen radiográfica es de líneas negras de poca ondulación, un poco más gruesas que un cabello, en la zona adyacente al cordón de soldadura. (Echevarria, 2002)

Figura 27*Fisuras en frío (ZAC)*

Fuente: (Echevarria, 2002).

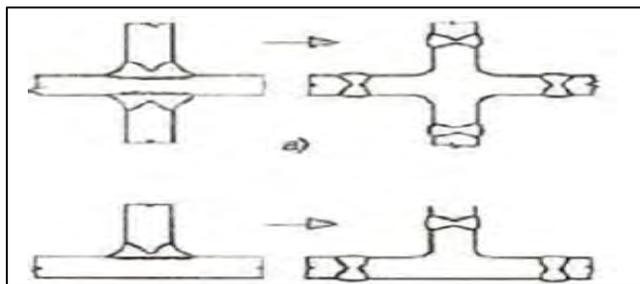
- **Desgarre laminar**

Son fisuras que pueden aparecer en los aceros dulces y de baja aleación, frecuentemente asociadas con soldaduras tensionadas, cuya geometría produce tensiones perpendiculares al plano de laminación sobre el metal base. Aparecen frecuentemente debajo de la ZAC (material base no afectado) y son típicas de juntas en T o en L.

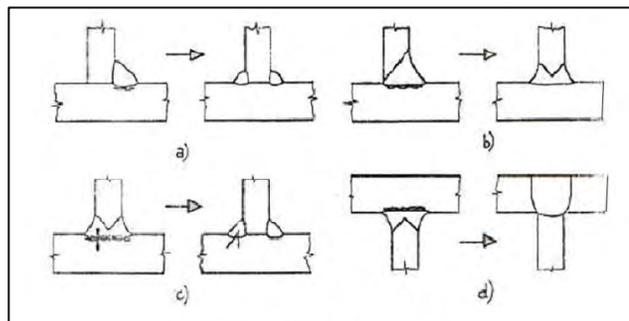
Los factores que producen estos defectos son:

1. Tensiones de enfriamiento más o menos intensas, en función de la rigidez de la estructura.
2. Geometría de la junta tal que la sollicitación actúe desfavorablemente sobre el metal base. Figuras 28, 29 y 30 (las flechas indican los arreglos más adecuados)
3. Material base laminado de medio y alto espesor (9 – 20 mm) susceptibles a desgarrarse.

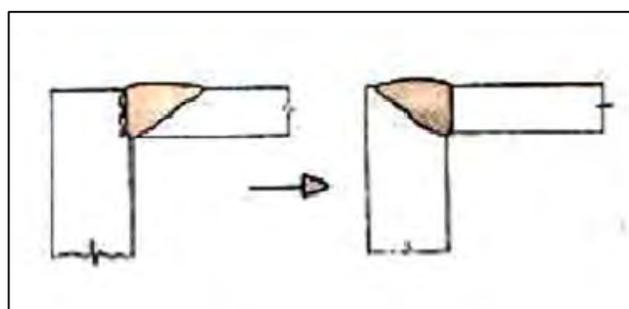
(Echevarria, 2002)

Figura 28*Desgarre laminar en juntas en cruz*

Fuente: (Echevarria, 2002)

Figura 29*Desgarre laminar en T*

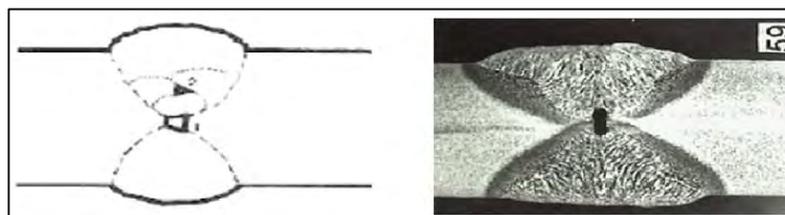
Fuente: (Echevarria, 2002)

Figura 30*Desgarre laminar en L*

Fuente: (Echevarria, 2002)

- **Falta de penetración**

Se da en la zona de raíz cuando no ha penetrado el metal fundido. Si la unión es en X o en K, la raíz queda en corazón mismo del cordón, siendo la falta del metal de aporte en dicha zona rigurosamente interna. Figura 31

Figura 31*Falta de penetración*

Fuente: (Echevarria, 2002)

Causas:

1. Puede originarse por falta de temperatura
2. Por exceso de velocidad de soldeo
3. Por falta de habilidad del soldador

Es posible que haya falta de penetración parcial (asociada a una falta de fusión) llamada así cuando uno de los talones no ha alcanzado a fundirse, o falta de penetración total, cuando la abertura de la raíz ha quedado sin rellenar.

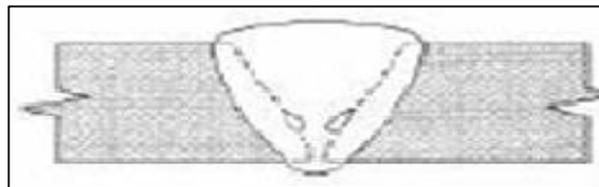
Radiográficamente aparece como una línea oscura continua o intermitente con los bordes rectos o irregulares. Es necesario advertir que, algunos tipos de uniones (algunas uniones en ángulo sin preparación de bordes) están concebidos de tal forma que siempre queda una falta de penetración en determinadas partes de la unión. (Echevarria, 2002)

- **Falta de fusión**

Generalmente ocasionada por falta de temperatura suficiente para fundir el metal base o el cordón anterior ya sólido. Figura 32

Figura 32

Falta de fusión



Fuente: (Echevarria, 2002)

Según su ubicación puede ser:

- **Falta de fusión en el bisel:** Entre el metal de soldadura y el metal base.
- **Falta de fusión de un bisel en la raíz (talón u hombros):**

Se produce:

1. Cuando es pequeña la abertura de la raíz (intersticio) y la temperatura no es lo suficientemente elevada.
 2. Por una incorrecta alineación de los elementos a soldar.
 3. Por fallas en la preparación.
 4. Por diferencias de espesor o diámetro.
 5. Por deficiente penetración por parte del soldador al realizar la primera pasada.
- (Soldadura latinoamericana (2008). Calidad. 2008)

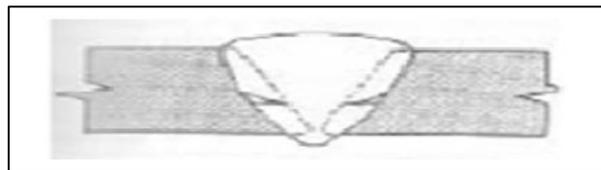
- **Falta de fusión entre pasadas**

Se produce en las interfases de la soldadura, donde las capas adyacentes del metal, o el metal base y el metal de soldadura no se fusionan debidamente, por lo general debido a una capa muy fina de óxido que se forma en las superficies. Esta capa de óxido puede deberse a una falta de calentamiento del metal base o al depósito previo del metal de soldadura en volumen suficientemente alto que impide que cualquier capa de óxido, escoria, impurezas, etc. migre a la superficie.

También puede deberse a la falta de corriente suficiente o la mala ubicación del arco eléctrico dentro de los biselés, el cual, al producirse más sobre uno, deja al otro sin fundir. Figura 33 (Soldadura latinoamericana (2008)).

Figura 33

Falta de fusión entre pasadas



Fuente: (Echevarria, 2002)

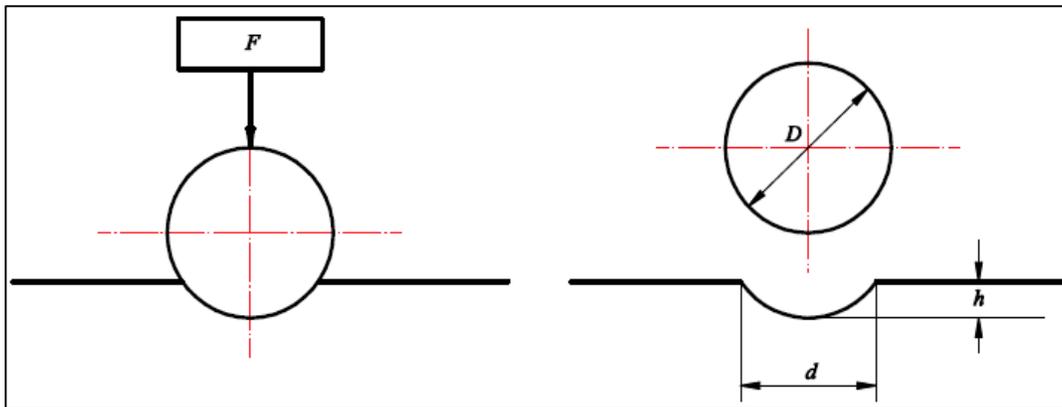
2.16. Dureza Brinell (HBW)

Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador o penetrador), de determinada forma y dimensiones.

En la figura 34, se puede observar la nomenclatura o los símbolos de la dureza Brinell.

Figura 34

Símbolos que describen la dureza Brinell



Fuente: (Echevarria, 2002)

Nota: Para el cálculo de la dureza Brinell, se usó como indentador una bola de acero de 10mm de diámetro.

El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{0.102F}{A} \quad \text{Ec. 9}$$

$$F = \frac{a * D^2}{0.102} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

F = Valor numérico de la fuerza (N).

A = Valor numérico de la superficie de la huella (mm²)

a= Grado de carga:

a = 30 (Para acero no templado y hierro fundido)

a = 10 (Para metales no ferrosos y sus aleaciones)

a = 5 (Para aluminio y zinc)

a = 2.5 (Metales de cojinetes)

a = 1.25 (Para plomo y estaño).

D = Diámetro de la bola (mm).

HB = Dureza Brinell.

2.17. Microestructura de los Aceros

Los constituyentes metálicos que pueden presentarse en los aceros al carbono son: ferrita, cementita, perlita, sorbita, troostita, martensita, bainita, y rara vez austenita, aunque nunca como único constituyente. También pueden estar presentes constituyentes no metálicos como óxidos, silicatos, sulfuros y aluminatos. Las microestructuras que presenta el diagrama de equilibrio para los aceros al carbono son:

a) Ferrita (Hierro α)

Es una solución sólida de carbono en hierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es del orden de 0.008% de carbono, por esto se considera como hierro puro, la máxima solubilidad de carbono en el hierro alfa es de 0,02% a 723 °C. La ferrita es la fase más blanda y dúctil de los aceros, cristaliza en la red cúbica centrada en el cuerpo, tiene una dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm², llegando hasta un alargamiento del 40%.

La ferrita se observa al microscopio como granos poligonales claros. En los aceros, la ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita, en los aceros de menos de 0.6% C , formando una red o malla que limita los granos de perlita, en los aceros de 0.6 a 0.85% C en forma de agujas o bandas aciculares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita como en los aceros en bruto de colada o en aceros que han sido sobrecalentados.

La ferrita también aparece como elemento eutectoide de la perlita formando láminas paralelas separadas por otras láminas de cementita, en la estructura globular de los aceros de herramientas aparece formando la matriz que rodea los glóbulos de cementita, en los aceros hipoeutectoides templados, puede aparecer mezclada con la martensita cuando el temple no ha sido bien efectuado.

b) Cementita

Es el carburo de hierro de fórmula Fe_3C , contiene 6.67 % C y 93.33 % de hierro, es el micro constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono alcanzando una dureza Brinell de 700 (68 RC) y cristaliza en la red ortorrómbica. En las probetas atacadas con ácidos se observa de un blanco brillante y aparece como cementita primaria o proeutéctica en los aceros con más de 0.9% C formando una red que envuelve los granos de perlita, formando parte de la perlita como láminas paralelas separadas por otras láminas de ferrita, se presenta en forma de glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita, cuando los aceros de alto carbono se han sometido a un recocido de globulización, en los aceros hipoeutectoides que no han sido bien templados.

c) Perlita

Es el micro constituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita, compuesta por el 88 % de ferrita y 12 % de cementita, contiene el 0.8 % C . Tiene una dureza de

250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm² y un alargamiento del 15%. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita y por la transformación isotérmica de la austenita en el rango de 650 a 723°C. Si el enfriamiento es rápido (100-200°C/s), si la perlita laminar se somete a un recocido a temperatura próxima a 723°C, la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, denominándose perlita globular.

d) Austenita

Es el constituyente más denso de los aceros y está formado por una solución sólida por inserción de carbono en hierro gamma. La cantidad de carbono disuelto, varía de 0.8 al 2 % C que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. La austenita no es estable a la temperatura ambiente, pero existen algunos aceros al cromo-níquel denominados austeníticos cuya estructura es austenita a temperatura ambiente.

La austenita está formada por cristales cúbicos centrados en las caras, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm² y un alargamiento del 30 %, no es magnética. La austenita no puede atacarse con nital, se disuelve con agua regia en glicerina apareciendo como granos poligonales frecuentemente maclados, puede aparecer junto con la martensita en los aceros templados.

e) Martensita

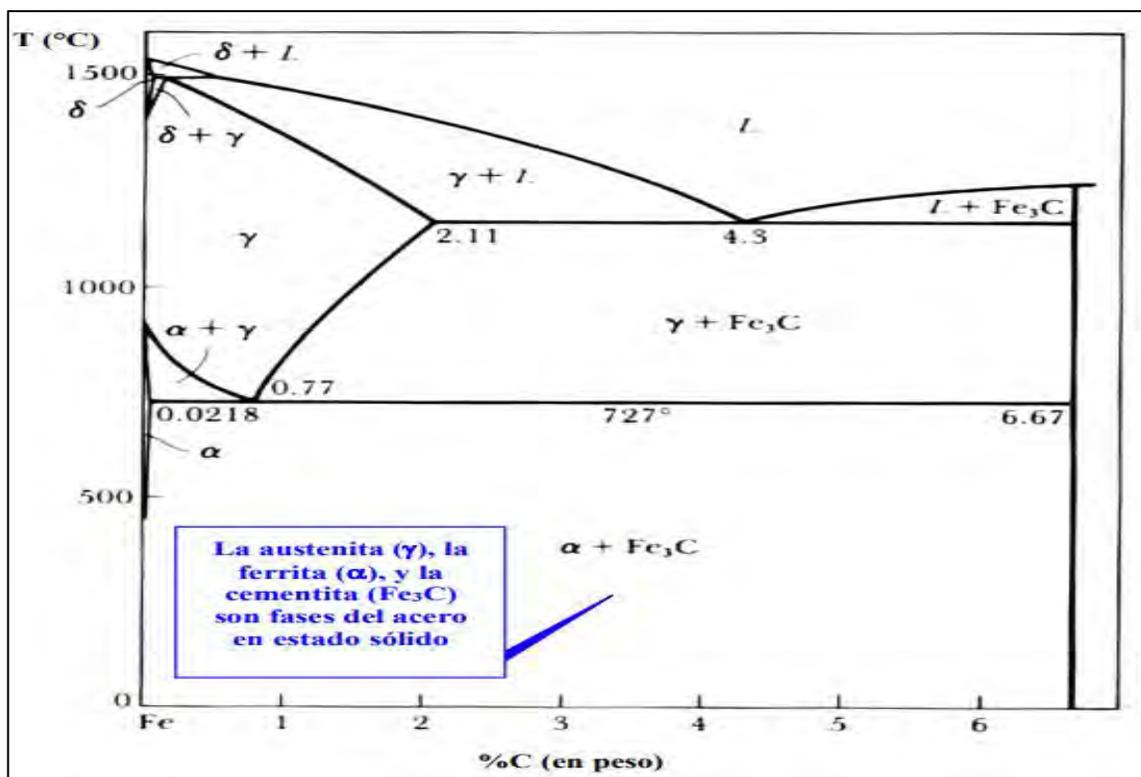
Es el constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas. El contenido de carbono suele variar desde muy poco carbono hasta el 1% de carbono, sus propiedades físicas varían con su contenido en carbono hasta un máximo de 0.7 %C. Es el constituyente de los aceros templados, está conformado

por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado auténtico a altas temperaturas.

El contenido de carbono suele variar desde muy poco carbono hasta el 1% de carbono, sus propiedades físicas varían con su contenido en carbono hasta un máximo de 0.7%C. La martensita tiene una dureza de 50 a 68 RC, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm² y un alargamiento del 0.5 al 2.5 %, muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60 grados. Los aceros templados suelen quedar demasiado duros y frágiles, inconveniente que se corrige por medio del revenido que consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a la crítica inferior (723°C), dependiendo de la dureza que se desee obtener, enfriándolo luego al aire o en cualquier medio.

Figura 35

Diagrama Fe - C



Fuente: Askeland, "La ciencia e ingeniería de materiales".

f) Troostita

Es un agregado muy fino de cementita y ferrita, se produce por un enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento ligeramente inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en el rango de temperatura de 500 a 600 °C, o por revenido a 400 °C.

Sus propiedades físicas son intermedias entre la martensita y la sorbita, tiene una dureza de 400 a 500 Brinell, una resistencia a la tracción de 140 a 175 kg/mm² y un alargamiento del 5 al 10%. Es un constituyente nodular oscuro con estructura radial apreciable a unos 1000X y aparece generalmente acompañando a la martensita y a la austenita.

g) Sorbita

Es también un agregado fino de cementita y ferrita. Se obtiene por enfriamiento de la austenita con una velocidad de enfriamiento bastante inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 600 a 650 °C, o por revenido a la temperatura de 600 °C. Su dureza es de 250 a 400 Brinell, su resistencia a la tracción es de 88 a 140 kg/mm², con un alargamiento del 10 al 20%. Con pocos aumentos aparece en forma muy difusa como manchas, pero con 1000X toma la forma de nódulos blancos muy finos sobre fondo oscuro, de hecho, tanto la troostita como la sorbita pueden considerarse como perlita de grano muy fino.

h) Bainita

Es el constituyente que se obtiene en la transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250 a 500 °C. Se diferencian dos tipos de estructuras: la bainita superior de aspecto arborescente formada a 500-580°C, compuesta por una matriz

ferrítica conteniendo carburos. Bainita inferior, formada a 250-400 °C tiene un aspecto acicular similar a la martensita y constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos.

La bainita tiene una dureza variable de 40 a 60 RC comprendida entre las correspondientes a la perlita y a la martensita. Los constituyentes que pueden presentarse en los aceros aleados son los mismos de los aceros al carbono, aunque la austenita puede ser único constituyente y además pueden aparecer otros carburos simples y dobles o complejos.

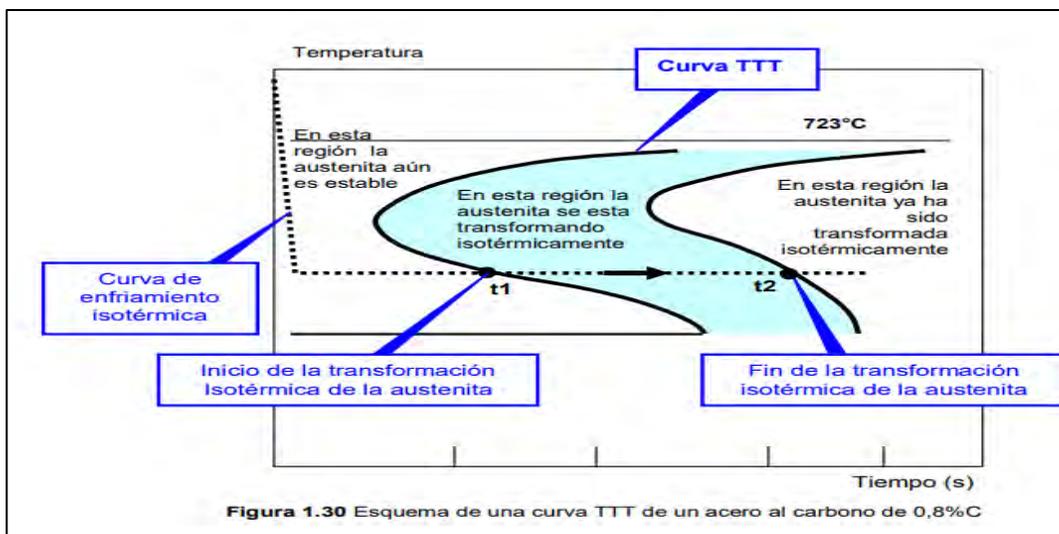
2.18. La transformación isotérmica de la austenita: Las curvas TTT o de la "S"

Se muestra la curva TTT para un acero de 0,8%C y una curva de enfriamiento isotérmico (líneas punteadas). En ella se puede apreciar que, para alcanzar la transformación isotérmica de la austenita, el acero es enfriado desde la temperatura de austenización a una temperatura inferior a A_{c1} (723°C), para lo cual es importante que el enfriamiento en esta primera etapa sea rápido. Para conseguir ese efecto, se enfría el acero en un baño de sales fundidas (que es un medio conductor del calor muy bueno) y se lo mantiene en él el tiempo necesario para que ocurra la transformación de la austenita.

Esta transformación ocurre isotérmicamente, es decir, manteniéndolo a una temperatura determinada. Al cabo de cierto tiempo (indicado por t_1 en la curva de la figura 36), se inicia la transformación de la austenita, la cual continúa durante un lapso de tiempo hasta completarse totalmente (tiempo t_2 indicado en la figura 36). Después de ese periodo de tiempo, la austenita no existe más en el acero (a esa temperatura), habiéndose transformado en un nuevo constituyente, el cual se mantendrá estable hasta la temperatura ambiente.

Figura 36

Esquema de una curva TTT de un acero al carbono de 0,8%C

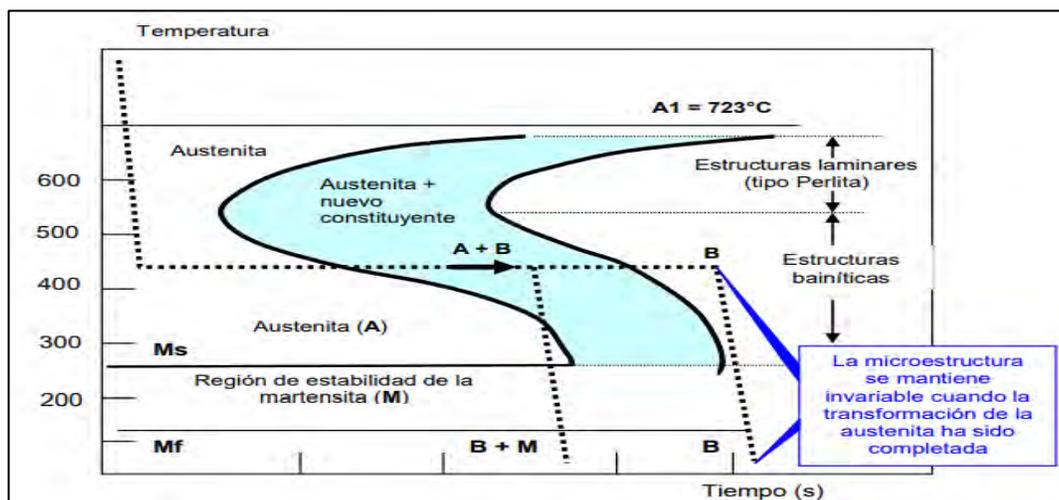


Fuente: Askeland, "La ciencia e ingeniería de materiales".

En una curva TTT, se pueden advertir claramente tres regiones en función de los constituyentes microestructurales que se forman de la transformación de la austenita (ver figura 37)

Figura 37

Esquema de una curva TTT mostrando las regiones de los nuevos microconstituyentes



Fuente: Askeland, "La ciencia e ingeniería de materiales".

Las regiones de los nuevos microconstituyentes

1. Zona de formación de la perlita (estructuras laminares) (de A1 a 550°C)

2. Zona de formación de la bainita (estructuras aciculares) (de 550°C a 230°C)

3. Zona de formación de la martensita (de Ms a Mf)

Es importante aclarar que la última zona correspondiente a la de formación de martensita no es el resultado de una transformación isotérmica de la austenita; sino, por el contrario, es de naturaleza "atérmica", pero suele indicarse en los diagramas TTT, pues limita la región inferior de la transformación bainítica y permite, además, visualizar, en un solo diagrama, todas las posibles transformaciones del acero fuera de las condiciones de equilibrio.

2.19. Crecimiento de Grano Austenítico

Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento.

Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Sin embargo, existen algunos aceros que pueden alcanzar temperaturas relativamente altas (alrededor de 982 °C) con muy poco crecimiento de grano, pero conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano.

2.19.1. Tamaño de grano

El tamaño de grano tiene un notable efecto en las propiedades mecánicas del metal. Los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. La temperatura, los elementos aleantes y el tiempo de impregnación térmica afectan el tamaño del grano. En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande.

Se distinguen dos tipos aceros, el de grano fino hereditario y el de grano grueso hereditario; el primero se caracteriza por ser poco propenso al crecimiento del grano; el segundo por ser muy propenso.

2.19.2. Clasificación de los tamaños de grano

El tamaño de grano se determina por medio de la cuenta de los granos en cada pulgada cuadrada bajo un aumento de 100X.

El tamaño, forma y orientación de los granos influyen fuertemente en las propiedades de los metales. Por esto es muy importante conocer, como regular y como medir el tamaño del grano. Usualmente los granos tienen diámetros de 10 a 250 μm .

- ✓ Grano fino hereditario: Es poco propenso al crecimiento del grano, el paso del punto crítico va acompañado por una brusca disminución de grano. Si se sigue calentando, el grano de la austenita, en el acero de grano fino, no crece hasta los 950 – 1000 °C, después de lo cual se eliminan los factores del cual impiden el crecimiento y el grano comienza a crecer rápidamente.
- ✓ Grano grueso hereditario: Es muy propenso al crecimiento del grano, en este caso nada impide su crecimiento, el cual comienza inmediatamente después de pasar el punto crítico es decir 723 °C.

La microestructura se caracteriza por el tamaño, forma y orientación de los granos. La composición determina la cantidad relativa de granos de cada fase y a menudo influye también en el tamaño de grano. El crecimiento del grano es un proceso que se desarrolla espontáneamente.

2.19.3. Control del tamaño del grano

El tamaño de grano de un material variará con el tiempo a la temperatura y la velocidad de enfriamiento. La temperatura a la que se produce la recristalización viene determinada por la composición química y suele situarse entre el 30 y el 50% del punto de fusión.

Si el material no se mantiene a temperatura durante el tiempo suficiente, la estructura resultante puede ser una combinación de granos viejos y nuevos. Si se desean propiedades uniformes en todo el metal, el proceso de recocido debe estar orientado a conseguir una estructura de grano uniforme y equiáxica. Uniforme significa que todos los granos tienen más o menos el mismo tamaño, y equiaxiado significa que todos tienen aproximadamente la misma forma.

Para conseguir una microestructura uniforme y equidistante, cada pieza debe recibir la misma cantidad de calor durante el mismo tiempo y enfriarse a la misma velocidad. Un tiempo de calentamiento más largo y/o una temperatura más alta darán como resultado una estructura de grano más grueso y un material más blando y viceversa.

2.20. Temperatura de precalentamiento y velocidad de enfriamiento crítica

Si precalentamos la plancha, conseguiremos disminuir la velocidad de enfriamiento después de la soldadura y reduciremos el riesgo de tener estructuras frágiles. Este justamente es el motivo por el cual se suelen precalentar los aceros fácilmente endurecibles (templables).

Para cada composición química de los aceros, existe una velocidad de enfriamiento crítica (VCT); si la velocidad de enfriamiento del metal de soldadura supera este valor crítico, se formarán estructuras martensíticas duras en la ZAC, existiendo el riesgo de agrietamiento en el caso de que se produzcan tensiones térmicas en presencia de hidrógeno en el interior del cordón de soldadura.

Las variables que afectan a la velocidad de enfriamiento y a la distribución de temperaturas máximas son la temperatura inicial, el espesor de la plancha y el aporte térmico. Si precalentamos para controlar la velocidad de enfriamiento, la temperatura requerida puede variar ampliamente en

función de las otras condiciones, pudiendo ser necesarios precalentamientos altos al soldar chapas gruesas con aportes térmicos bajos, especialmente en uniones en ángulo.

La selección de la temperatura de precalentamiento debe efectuarse teniendo en cuenta tanto los cálculos teóricos como la experiencia práctica. La temperatura de precalentamiento óptima es aquella que mantiene una velocidad de enfriamiento ligeramente inferior a la velocidad crítica (VCT) con un cierto margen de seguridad. El precalentamiento excesivo, además de incrementar las condiciones desfavorables para el soldador, aumenta el tamaño de la ZAC.

2.21. Calificación del Procedimiento

Previo al depósito de soldadura, mediante un documento se establecerá y calificará detalladamente el procedimiento de soldadura para garantizar una buena unión. La calidad del depósito de soldadura debe ser comprobada mediante ensayos destructivos y no destructivos., según sea el requerimiento.

2.21.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS)

Un WPS es un documento preparado y calificado donde se indica las instrucciones al personal que realiza e inspecciona las soldaduras de producción.

2.21.2. Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)

Es un documento que valida y respalda el WPS. EL PQR contiene las variables reales de soldadura utilizadas en la prueba y los resultados del ensayo realizado sobre la soldadura para propósitos de calificar las especificaciones del procedimiento de soldadura. El PQR es el registro que documenta los resultados de soldadura y ensayos de las probetas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

- ✓ Cuantitativa: En la presente investigación recopilamos y analizamos los datos basados en la hipótesis.

3.1.1.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

- ✓ Descriptivo

Esta investigación se realiza describiendo el problema en una circunstancia determinada, formulando preguntas y analizando los datos que se llevaran a cabo. Además, esta investigación será la más adecuada para la problemática de la investigación, por su origen y su desarrollo.

- ✓ Experimental

Con esta investigación se pretende conocer las causas y efectos de las variables. En la cual, se pretende manipular las variables independientes y a consecuencia de ellas, posteriormente se mide las variables dependientes.

- ✓ Analítico

En la presente investigación se parte de lo general a lo específico, basándose en lo experimental. Por lo tanto, se analizará y evaluará los datos e información obtenida del desarrollo de la investigación.

3.1.2 *MÉTODO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN*

3.1.2.1 MÉTODO

- ✓ Método deductivo

3.1.2.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Emplearemos una investigación por objetivos conforme al siguiente esquema

$$OG \left\{ \begin{array}{l} Oe1 \rightarrow He1 \\ Oe2 \rightarrow He2 \end{array} \right\} HG \rightarrow CF$$

Donde:

OG	: Objetivo General
Oe1	: Objetivo específico 1
Oe2	: Objetivo específico 2
HG	: Hipótesis General
He1	: Hipótesis específico 1
He2	: Hipótesis específico 2
CF	: Conclusión Final

3.1.3 *POBLACIÓN Y MUESTRA*

3.1.3.1 POBLACIÓN

En la presente investigación se determina como población a los aceros al carbono.

3.1.3.2 MUESTRA

La muestra seleccionada es el acero microaleado HARDOX 450.

3.1.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLECTA DE DATOS

3.1.4.1 TÉCNICA

Para la realización del presente trabajo de investigación se recurrirá a la técnica de la “Observación directa”.

3.1.4.2 INSTRUMENTOS

Durante el desarrollo del trabajo de investigación se usarán los siguientes instrumentos:

- ✓ máquina de soldar por arco eléctrico
- ✓ microscopio metalográfico
- ✓ durómetro

3.2 VIABILIDAD

El desarrollo del presente trabajo de investigación es viable, porque se cuenta con los equipos y materiales necesarios para la experimentación y control de calidad.

3.3 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA

Para la presente investigación se eligió el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), porque el equipo de soldeo es de menor costo comparado con el equipo de soldeo del proceso GMAW o aún más todavía con el proceso FCAW.

El proceso SMAW es utilizado en los procesos de fabricación de conjuntos soldados como: las tolvas, plataformas, trituradoras, remolques, contenedores, etc. Además, que, el equipo de soldeo es más sencillo, ligero y de fácil traslado para realizar construcciones en campo, así como, para realizar mantenimiento in situ que durante el soldeo de juntas se ve poco afectada

por el viento y corrientes de aire; todo lo contrario, al proceso GMAW, también cabe resaltar que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.

La selección del proceso SMAW para la presente investigación es por su sencillez, el costo del equipo y el costo de producción es económico, debido a que no requiere bobinas de alambre, ni gases de protección adicional. Además, es el proceso SMAW el que se utiliza a diario en los trabajos de mantenimiento.

Por otro lado, se cuenta con el equipo de soldeo del proceso SMAW para realizar las pruebas de soldeo y además porque suelda aceros al carbono; en la cual, para nuestra investigación se utilizará el acero HARDOX 450, éste es un acero al carbono de bajo contenido y el espesor del metal base a soldar es de 1/4 de pulgada (6.175 mm). Lo que se traduce, que el proceso SMAW suelda aceros al carbono y espesores mayores a 2 mm, pero menores a 38 mm por temas de productividad. Y los conjuntos soldados obtenidos por este proceso tienen buen comportamiento en servicio y garantiza uniones de calidad.

3.4 MATRIZ DE CONSISTENCIA

La matriz de consistencia se muestra en el Anexo 3

CAPITULO IV

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Equipos y Materiales Utilizados en la Investigación

4.1.1 Equipos para la Investigación

a) Equipo de soldeo

Para la soldabilidad de las probetas, se hizo uso de la fuente de poder mostrada en la figura 38, cuyas características son:

- Marca: ESAB
- Fases: 03
- Rango de corriente: 20-240 A
- Tensión en vacío: 75 V

Figura 38

Equipo de soldeo



Fuente: Elaboración propia

b) *Durómetro de banco*

El equipo se muestra en la figura 39, cuyas características son:

- Posee cargas de ensayo
- Marca: Time
- Modelo: TH500
- Tecnología: Analógico
- Dureza mínima medible - Dureza máxima medible: 20 HRA/B/C - 100 HRB

Figura 39

Durómetro de banco



c) *Equipo de ensayo de doblado*

Este equipo pertenece al taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. En la figura 40 se puede observar el equipo de ensayo de doblez, cuya presión de trabajo es de 20 toneladas.

Figura 40*Equipo para ensayo de doblado guiado*

Fuente: Elaboración propia

d) Microscopio metalográfico

En la Tabla 6 se muestra dicho equipo, cuyas características son:

Tabla 6*Muestra de características*

Especificación	Microscopio PETIP
Alimentación	220V, C.A/50 Hz
Mesa	Fija
Aumento	De 100 a 1000
Ajuste micrométrico y macrométrico	Mediante perillas
portaobjetos	Con sistema de enganche y presión

Fuente: Elaboración propia

4.2 Materiales Usados para la Experimentación*a) Material de estudio*

Para la investigación se ha seleccionado el acero HARDOX 450. Las probetas para la investigación tienen las siguientes características:

- Forma del producto: Plancha de acero
- Dimensiones de la probeta:
 - Ancho: 50 mm
 - Longitud: 150 mm
 - Espesor: 1/4 pulg (6.175 mm)

La composición química del acero inoxidable HARDOX 450 se detalla en la tabla 7.

Tabla 7

Composición química (valores máximos) del acero HARDOX 450

Tipo	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%B
HARDOX 450	0.18	1.30	0.25	0.015	0.004	0.10	0.04	0.10	0.003

Fuente: www.ssab.com

b) Consumible para la soldadura

- Electrodo E-7018

Este material de aporte está diseñado para producir soldaduras de alta calidad en aplicaciones en las cuales el metal base tiene el peligro de producir agrietamiento. El arco que produce es sumamente estable, produce poco chisporroteo y para mejores resultados se usa un arco corto.

Se recomienda mantener un arco corto para garantizar buenos resultados en inspecciones radiográficas. Este electrodo permite soldar en posición plana, horizontal, sobrecabeza, vertical ascendente y vertical descendente.

Aplicaciones:

- Para aceros de mediano y bajo carbono, baja aleación

- Para aceros laminados en frío, por sus características de resistencia a la deformación a altas temperaturas, su fácil manejo y óptimo rendimiento, es especialmente adecuado
- Para soldadura de tuberías de vapor
- Calderas de alta presión y tanques
- Piezas para maquinaria pesada
- Construcciones metálicas en obra
- Reparaciones Navales

En la tabla 8 se muestra su composición química.

Tabla 8

Composición química

C	Mn	Si	P	S
0.05	1.00	0.60	0.020 máx.	0.020 máx.

Fuente: (Soldexa, 2015)

Nota: En el anexo 1, se muestra su ficha técnica.

4.3 Soldadura de las Probetas

4.3.1 Preparación de las Probetas

Previo al soldeo de las probetas, se realizaron las siguientes operaciones:

a) Limpieza de las probetas.

Las probetas deben estar exentas de grasas, pinturas, para lo cual se usó disolventes no clorados.

b) Preparación de las probetas

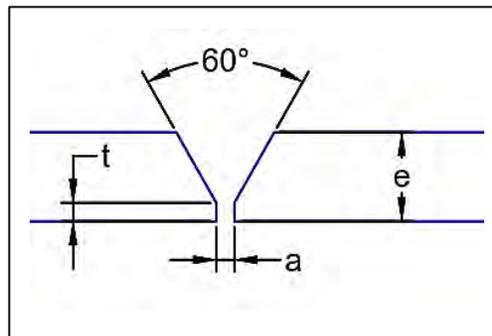
Con ayuda de una amoladora se realizó los biseles, tal como se observa en la figura 41.

Figura 41*Preparación de las probetas*

Fuente: Elaboración propia

c) Tipo de bisel

Se seleccionó la junta a tope con bisel en “V”, cuya figura esquemática se muestra en la figura 42.

Figura 42*Características del bisel*

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se detallan las dimensiones del bisel.

Tabla 9

Dimensiones de la probeta de experimentación

Símbolo	Descripción	Probeta de experimentación
a	Cara de la raíz	2 mm
e	Espesor nominal del material base o de la probeta.	1/4 pulg. (6.175 mm)
t	Abertura de raíz	2 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 43 se observa las probetas listas para el soldeo.

Figura 43

Probetas para la soldadura



Fuente: Elaboración propia

4.4 Soldadura de las Probetas

a) Cálculo del carbono equivalente

Tomando los valores de la tabla 7 y reemplazando en la ecuación 8 del capítulo II, se tiene:

$$CE = 0.18 + \frac{1.30 + 0.04}{10} + \frac{0.10}{20} + \frac{0.10}{40}$$

$$CE = 0.32$$

b) Condiciones de soldadura de las probetas

En la tabla 10 se indican las condiciones de soldadura para la unión de las probetas.

Tabla 10*Condiciones para realizar la soldadura de raíz*

Proceso	SMAW
Espesor de las probetas	1/4 pulg. (6.175 mm)
Posición de soldadura	1G
Numero de pasadas	01
Polaridad	DCEP (inversa)
Material de aporte	AWS E 7018 Diámetro: 1/8"
Angulo del electrodo	75°
Tipo de junta	A tope, simple "V" con 60°

Fuente: Elaboración propia.

c) Parámetros de soldabilidad

En la tabla 11 se detallan las variables seleccionadas para la soldadura del material base.

Tabla 11*Parámetros de soldadura*

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Velocidad de desplazamiento (mm/s)
1	85	21.5	2.6
2	100	22.0	3.0
3	115	22.0	3.4
4	120	22.5	3.5
5	140	22.5	3.6

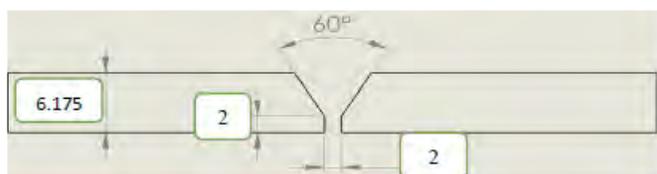
Fuente: Elaboración propia

d) Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) para las probetas de experimentación

A continuación, se detallan los WPS, para las probetas experimentadas.

Tabla 12*Especificaciones para la soldadura probeta 1*

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica							
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica							
Especificaciones para la soldadura probetas					WPS		
Institución:	Particular		Identificación N°:	Probeta N° 1			
Proceso de soldadura:	SMAW		Soporte PQR N°:	PQR – 01			
Tipo:	Manual:	X	Automático:	Maquina:			
Revisión:	00	Fecha:	22/10/2021	Revisado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe		
Diseño de la junta			Posición				
Tipo de junta:	A tope		Ranura:	1G	Filete:		
Tipo de soldadura:	Ranura en v		Plancha:	Tubería:			
Abertura de raíz:	2 mm		Características eléctricas				
Longitud de raíz:	2 mm						
Angulo de ranura:	60°						
Soporte:	No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:	E 7018		Dc:	Dcep	85 A		
Limpieza de la raíz:	No		Pulso:	Dcen			
Metal base			Técnica				
Datos	M.b.1	M.b.2	Aportación	Oscilación	Recta X		
Grupo:	1	1	Pase:	Múltiple	Simple		
Especificación	Hardox 450		Limpieza en pases	N/a			
Grado:			Precalentamiento				
Espesor:	6.175 mm	6.175 mm	Temperatura de precalentamiento:	N/A			
Diámetro:			Temperatura interfase:	N/A			
			Postcalentamiento				
			Temperatura:	N/A	Tiempo:		
			N/A				
Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente:	Gas:			
Calificación AWS:	A5.5		Composición	Composición			
Marca:	Oerlikon		Veloc. Flujo				
Tamaño de alambre:							
Procedimiento de soldadura							
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Veloc. De desplazamiento. (mm/s)
		Clase	Diámetro (Pulg)	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)		
1	SMAW	E7018	1/8"	DC+	85	21.5	2.6

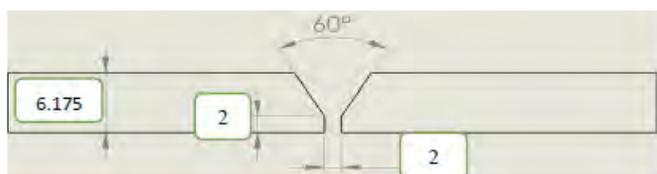


Elaborado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe	Fecha:	22/10/2021
Revisado por:	Ing. Mg. Elías Peña P.	Institución:	UNSAAC

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13*Especificaciones para la soldadura probeta 2*

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica							
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica							
Especificaciones para la soldadura probetas					WPS		
Institución:	Particular		Identificación N°:	Probeta N° 2			
Proceso de soldadura:	SMAW		Soporte PQR N°:	PQR – 02			
Tipo:	Manual:	X	Automático:	Maquina:			
Revisión:	00	Fecha:	22/10/2021	Revisado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe		
Diseño de la junta			Posición				
Tipo de junta:	A tope		Ranura:	1G	Filete:		
Tipo de soldadura:	Ranura en v		Plancha:	Tubería:			
Abertura de raíz:	2 mm		Características eléctricas				
Longitud de raíz:	2 mm						
Angulo de ranura:	60°						
Soporte:	No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:	E 7018		Dc:	Dcep	100 A		
Limpieza de la raíz:	Si		Pulso:	Dcen			
Metal base			Técnica				
Datos	M.b.1	M.b.2	Aportación	Oscilación	Recta X		
Grupo:	1	1	Pase:	Múltiple	Simple		
Especificación	Hardox 450		Limpieza en pases	N/a			
Grado:			Precalentamiento				
Espesor:	6.175 mm	6.175 mm	Temperatura de precalentamiento:	N/a			
Diámetro:			Temperatura interfase:	N/a			
			Postcalentamiento				
			Temperatura:	N/a	Tiempo:		
			N/a				
Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente:	Gas:			
Calificación AWS:	A5.5		Composición	Composición			
Marca:	Oerlikon		Veloc. Flujo				
Tamaño de alambre:							
Procedimiento de soldadura							
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Veloc. De desplazamiento. (mm/s)
		Clase	Diámetro (Pulg)	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)		
1	SMAW	E7018	1/8"	DC+	100	22	3.0

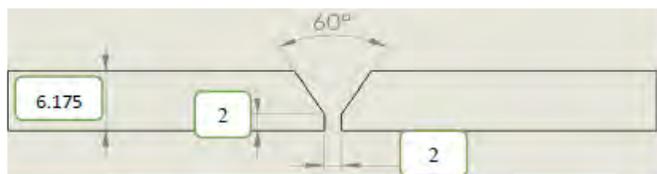


Elaborado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe	Fecha:	22/10/2021
Revisado por:	Ing. Mg. Elías Peña P.	Institución:	UNSAAC

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14*Especificaciones para la soldadura probeta 3*

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica							
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica							
Especificaciones para la soldadura probetas					WPS		
Institución:	Particular		Identificación N°:	Probeta N° 3			
Proceso de soldadura:	SMAW		Soporte PQR N°:	PQR – 03			
Tipo:	Manual:	X	Automático:	Maquina:			
Revisión:	00	Fecha:	22/10/2021	Revisado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe		
Diseño de la junta			Posición				
Tipo de junta:	A tope		Ranura:	1G	Filete:		
Tipo de soldadura:	Ranura en v		Plancha:	Tubería:			
Abertura de raíz:	2 mm		Características eléctricas				
Longitud de raíz:	2 mm						
Angulo de ranura:	60°						
Soporte:	No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:	E 7018		Dc:	Dcep	115 A		
Limpieza de la raíz:			Pulso:	Dcen			
Metal base			Técnica				
Datos	M.b.1	M.b.2		Aportación	Oscilación Recta X		
Grupo:	1	1		Pase:	Múltiple Simple		
Especificación	Hardox 450		Hardox 450	Limpieza en pases	N/a		
Grado:			Precalentamiento				
Espesor:	6.175 mm	6.175 mm		Temperatura de precalentamiento:	N/a		
Diámetro:			Temperatura interfase:		N/a		
			Postcalentamiento				
			Temperatura:	N/a	Tiempo: N/a		
Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente:	Gas:			
Calificación AWS:	A5.5		Composición	Composición			
Marca:	Oerlikon		Veloc. Flujo				
Tamaño de alambre:							
Procedimiento de soldadura							
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Veloc. De desplazamiento. (mm/s)
		Clase	Diámetro (Pulg)	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)		
1	SMAW	E7018	1/8"	DC+	115	22	3.4

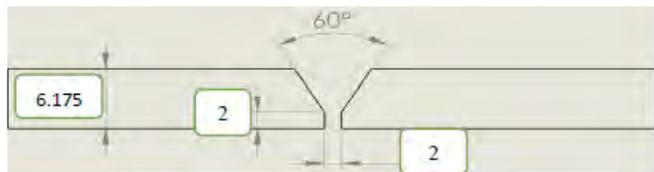


Elaborado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe	Fecha:	22/10/2021
Revisado por:	Ing. Mg. Elías Peña P.	Institución:	UNSAAC

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15*Especificaciones para la soldadura probeta 4*

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica							
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica							
Especificaciones para la soldadura probetas					WPS		
Institución:	Particular		Identificación N°:	Probeta N° 4			
Proceso de soldadura:	SMAW		Soporte PQR N°:	PQR – 04			
Tipo:	Manual:	X	Automático:	Maquina:			
Revisión:	00	Fecha:	22/10/2021	Revisado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe		
Diseño de la junta			Posición				
Tipo de junta:	A tope		Ranura:	1G	Filete:		
Tipo de soldadura:	Ranura en v		Plancha:	Tubería:			
Abertura de raíz:	2 mm		Características eléctricas				
Longitud de raíz:	2 mm						
Angulo de ranura:	60°						
Soporte:	No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:	E 7018		Dc:	Dcep	120 A		
Limpieza de la raíz:			Pulso:	Dcen			
Metal base			Técnica				
Datos	M.b.1	M.b.2		Aportación	Oscilación Recta X		
Grupo:	1	1		Pase:	Múltiple Simple		
Especificación	Hardox 450		Hardox 450	Limpieza en pases	N/a		
Grado:			Precalentamiento				
Espesor:	6.175 mm	6.175 mm		Temperatura de precalentamiento:	N/a		
Diámetro:			Temperatura interfase:		N/a		
			Postcalentamiento				
			Temperatura:	N/a	Tiempo: N/a		
Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente:	Gas:			
Calificación AWS:	A5.5		Composición	Composición			
Marca:	Oerlikon		Veloc. Flujo				
Tamaño de alambre:							
Procedimiento de soldadura							
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Veloc. De desplazamiento. (mm/s)
		Clase	Diámetro (Pulg)	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)		
1	SMAW	E7018	1/8"	DC+	120	22.5	3.5

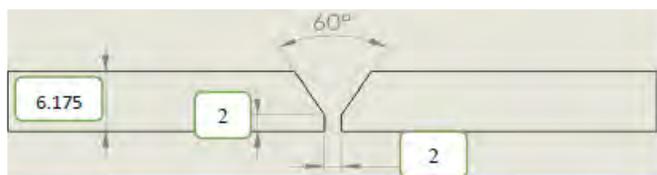


Elaborado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe	Fecha:	22/10/2021
Revisado por:	Ing. Mg. Elías Peña P.	Institución:	UNSAAC

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16
Especificaciones para la soldadura probeta 5

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica							
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica							
Especificaciones para la soldadura probetas					WPS		
Institución:	Particular		Identificación N°:	Probeta N° 5			
Proceso de soldadura:	SMAW		Soporte PQR N°:	PQR – 05			
Tipo:	Manual: X	Automático:	Semiautomático:	Maquina:			
Revisión:	00	Fecha:	22/10/2021	Revisado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe		
Diseño de la junta			Posición				
Tipo de junta:	A tope		Ranura:	1G	Filete:		
Tipo de soldadura:	Ranura en v		Plancha:	Tubería:			
Abertura de raíz:	2 mm		Características eléctricas				
Longitud de raíz:	2 mm						
Angulo de ranura:	60°						
Soporte:	No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:	E 7018		Dc:	Dcep	140 A		
Limpieza de la raíz:			Pulso:	Dcen			
Metal base			Técnica				
Datos	M.b.1	M.b.2	Aportación	Oscilación	Recta X		
Grupo:	1	1	Pase:	Múltiple	Simple		
Especificación	Hardox 450		Limpieza en pases	N/a			
Grado:			Precalentamiento				
Espesor:	6.175 mm	6.175 mm	Temperatura de precalentamiento:	N/a			
Diámetro:			Temperatura interpase:	N/a			
			Postcalentamiento				
			Temperatura:	N/a	Tiempo: N/a		
Metal de aporte			Protección				
Especificación:	A5.5		Fundente:	Gas:			
Calificación AWS:	A5.5		Composición	Composición			
Marca:	0erlikon		Veloc. Flujo				
Tamaño de alambre:							
Procedimiento de soldadura							
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Veloc. De desplazamiento. (mm/s)
		Clase	Diámetro (Pulg)	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)		
1	SMAW	E7018	1/8"	DC+	140	22.5	3.6



Elaborado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe	Fecha:	22/10/2021
Revisado por:	Ing. Mg. Elías Peña P.	Institución:	UNSAAC

Fuente: Elaboración propia

En la figura 44 se observa la soldabilidad de las probetas, en la figura 45 se observa las probetas soldadas.

Figura 44

Soldabilidad de las probetas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45

Probetas soldadas



Fuente: Elaboración propia

4.5 Cálculo del Calor Aportado

Para el cálculo del aporte de calor, se calculó haciendo uso de la ecuación 3 y reemplazando en ella los valores de la tabla 11.

Se tomo el valor de 85% de eficiencia para el proceso de soldadura utilizado.

El cálculo del calor neto aportado para cada una de las probetas es:

Probeta 1:

$$H_{net} = \frac{21.5 \times 85}{2.6} \times 0.75 = 527.16 \text{ J/mm}$$

$$H_{net} = 527.16 \text{ J/mm}$$

Probeta 2:

$$H_{net} = \frac{22 \times 100}{3} \times 0.75 = 550.0 \frac{J}{mm}$$

$$H_{net} = 550.0 \frac{J}{mm}$$

Probeta 3:

$$H_{net} = \frac{22 \times 115}{3.40} \times 0.75 = 558.08 \text{ J/mm}$$

$$H_{net} = 558.08 \text{ J/mm}$$

Probeta 4:

$$H_{net} = \frac{22.5 \times 120}{3.5} \times 0.75 = 565.71 \text{ J/mm}$$

$$H_{net} = 565.71 \text{ J/mm}$$

Probeta 5:

$$H_{net} = \frac{22.5 \times 140}{3.6} \times 0.75 = 656.25 \text{ J/mm}$$

$$H_{net} = 656.25 \text{ J/mm}$$

4.6 Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor

Para saber la influencia del calor aportado en la microestructura del metal base, se calcula el ancho de la zona afectada por medio de la ecuación 3, para las condiciones del trabajo experimental se tomaron los siguientes valores:

- T ambiente = 15°C
- T fusión= 1425 °C
- $\rho = 0.0785 \text{ gr/mm}^3$
- $C = 0.056050 \text{ J/gr-}^\circ\text{C}$
- $\rho.C = 0.0044 \text{ J/mm}^3\text{-}^\circ\text{C}$ (Fosca. C. 2007)
- t (espesor) = 6.175 mm
- T_{máx} = 723 °C
- K= Conductividad térmica del acero (0.052 J/mm-s-°C)

Probeta N° 1:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 15} \right) - \left(\frac{1}{1535 - 15} \right) \right] \times \left[\frac{527.16}{4.13 \times 0.0044 \times 6.175} \right] = 3.54 \text{ mm}$$

Probeta N° 2:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 15} \right) - \left(\frac{1}{1535 - 15} \right) \right] \times \left[\frac{550.00}{4.13 \times 0.0044 \times 6.175} \right] = 3.70 \text{ mm}$$

Probeta N° 3:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 15} \right) - \left(\frac{1}{1535 - 15} \right) \right] \times \left[\frac{558.08}{4.13 \times 0.0044 \times 6.175} \right] = 3.75 \text{ mm}$$

Probeta N° 4:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 15} \right) - \left(\frac{1}{1535 - 15} \right) \right] \times \left[\frac{565.71}{4.13 \times 0.0044 \times 6.175} \right] = 3.80 \text{ mm}$$

Probeta N° 5:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 15} \right) - \left(\frac{1}{1535 - 15} \right) \right] \times \left[\frac{656.25}{4.13 \times 0.0044 \times 6.175} \right] = 4.41 \text{ mm}$$

4.7 Cálculo de la Velocidad de Enfriamiento

Con la ecuación 6 se calcula el “espesor relativo de la chapa”, que es un valor adimensional, para determinar si la probeta corresponde a una plancha delgada o gruesa.

$$r = 6.175 \sqrt{\frac{0.0044(1535 - 15)}{565.71}} = 0.49$$

$$r = 0.49$$

El valor calculado es mayor a 0.49, entonces se aplica la ecuación 6.

- **Velocidad de enfriamiento en el depósito de soldadura (1535 °C) (en la Figura 43 señalado con a)**

$$R = 2\pi * 0.052 * 0.0044 \left[\frac{6.175}{565.71} \right]^2 \cdot (1535 - 15)^3$$

$$R = 601.52 \text{ °C/s}$$

- **Velocidad de enfriamiento para un ancho de 1.90 mm. (en la Figura 43 señalado con b)**

$$- \quad T_{max} = \frac{1}{\frac{4.13 \times 0.0044 \times 6.175 \times 1.90}{565.71} + \frac{1}{1535-15}} + 15$$

$$- \quad T_{max} = 981.40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = 2\pi * 0.052 * 0.0044 \left[\frac{6.175}{565.71} \right]^2 \cdot (981.40 - 15)^3$$

$$R = 154.59 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

- **Velocidad de enfriamiento para un ancho de 3.80 mm. (en la Figura 43 señalado con c)**

$$- \quad T_{max} = \frac{1}{\frac{4.13 \times 0.0044 \times 6.175 \times 3.80}{565.71} + \frac{1}{1535-15}} + 15$$

$$- \quad T_{max} = 723.39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = 2\pi * 0.052 * 0.0044 \left[\frac{6.175}{565.71} \right]^2 \cdot (723.39 - 15)^3$$

$$R = 60.89 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

4.8 Ensayo de Dureza

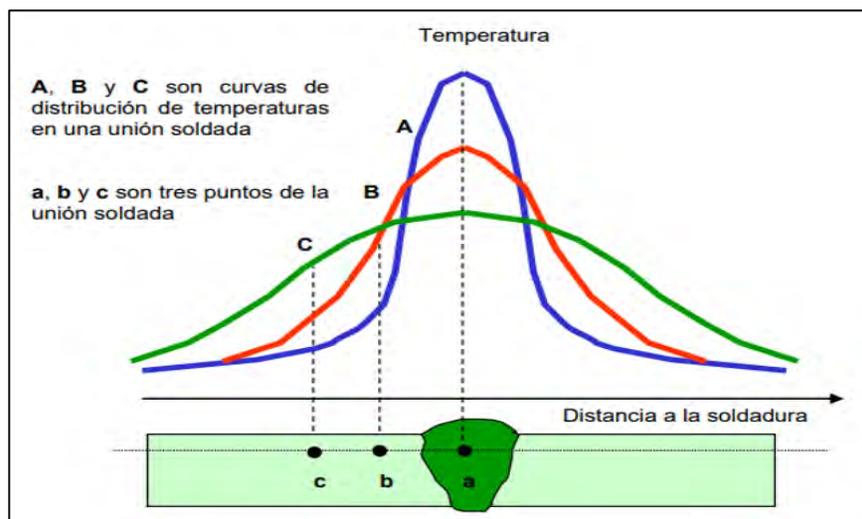
La prueba se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Diámetro de la bola (D): 5 mm

Los puntos donde se tomaron las pruebas de dureza, se muestran en la figura 46.

Figura 46

Las curvas representan momentos diferentes durante la soldadura



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 17, se detallan las dimensiones y cálculos realizados.

Tabla 17

Dimensión de las indentaciones y cálculo del grado de carga

Probeta	Diámetro del indentador (mm)	Temperatura (°C)	Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Diámetro de la indentación (mm)	Grado de carga
4	5	(a) 1535.00	601.52	1.3	1.35
	5	(b) 981.40	154.59	1.4	1.57
	5	(c) 723.39	60.89	1.45	1.68

Fuente: Elaboración propia

4.9 Control de calidad

a) Inspección visual

El objetivo es el determinar el grado de fiabilidad del conjunto inspeccionado. La inspección visual se realiza antes, durante y después de la soldadura.

Antes de la soldadura se verifico la calidad y el estado del metal base y de los materiales de aporte usados, los preparativos para la soldadura, la presentación de la junta y la limpieza de la

junta. Durante el soldeo se verificó que las variables de soldadura estén de acuerdo con el procedimiento de soldadura, la calidad del depósito de la soldadura, la limpieza del depósito.

Después de realizado la soldadura de las probetas, se procede a realizar la evaluación por inspección visual de las uniones soldadas con el fin de detectar discontinuidades sobre los requisitos dispuestos en códigos para el buen comportamiento en servicio de las construcciones soldadas.

b) Inspección con tintes penetrantes (fluorescentes)

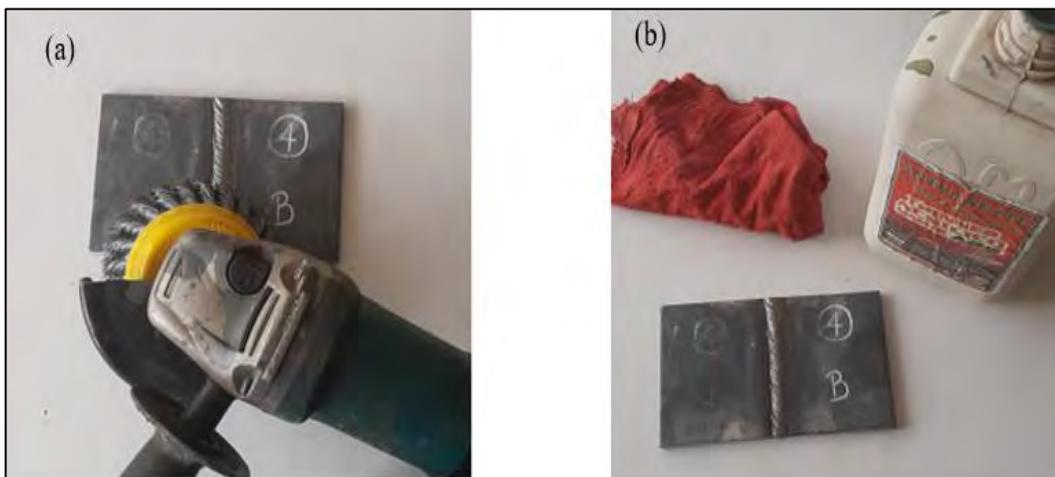
Se siguió el siguiente procedimiento:

1. Limpieza de la superficie

Se realiza la limpieza mecánica y química de la superficie o el área a inspeccionar. La limpieza mecánica se realizó con una escobilla de acero inoxidable Y la limpieza química con un paño humedecido con un disolvente (thinner). En la figura 47, observa la operación de limpieza mecánica y química.

Figura 47

Limpieza mecánica (a) y química (b)



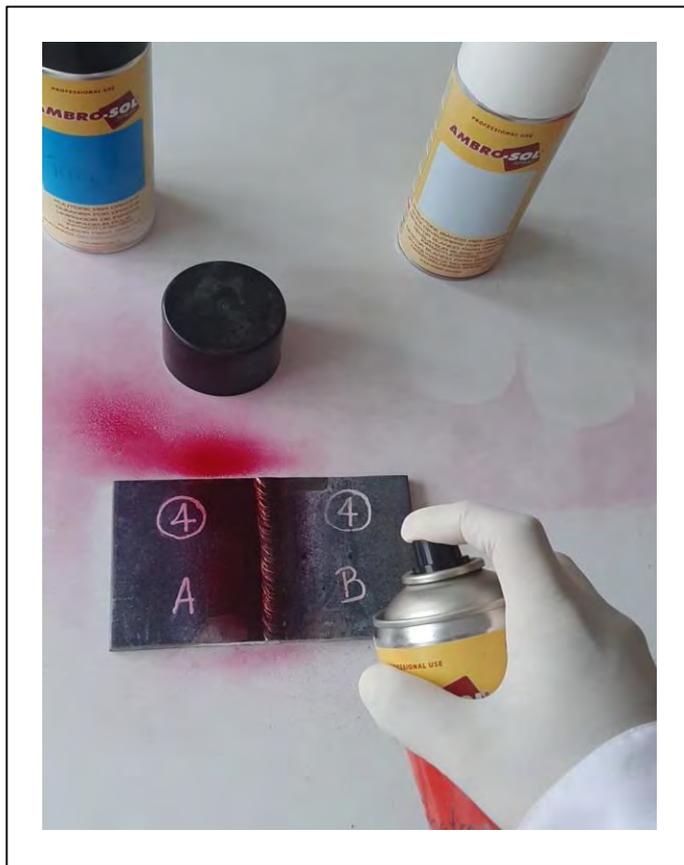
Fuente: Elaboración propia.

2. *Aplicación del líquido penetrante*

Una vez limpia la superficie a examinar, se cubrió con el penetrante la zona a examinar, tal como se muestra en la figura 48, sumergiéndolo por el tiempo de 10 minutos con la finalidad de que el líquido se introduzca en las discontinuidades.

Figura 48

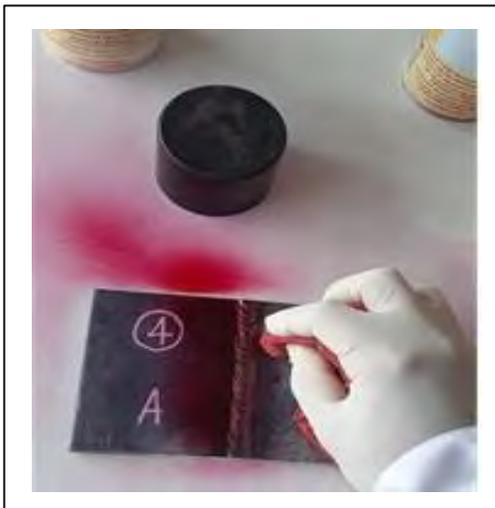
Aplicación del penetrante



Fuente: Elaboración propia

3. *Retiro de exceso de penetrante*

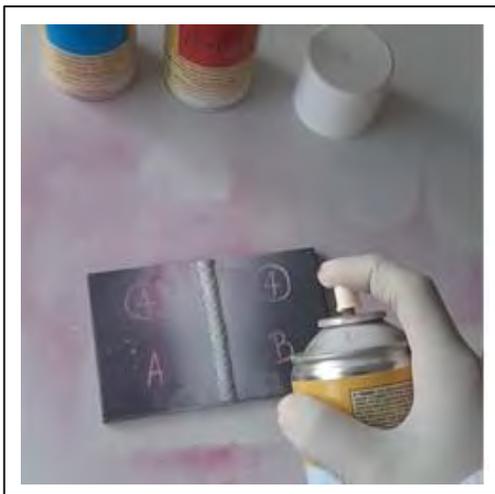
Transcurrido 10 minutos después de aplicar el líquido penetrante, se retira con un paño limpio y chorro de agua de mínimo caudal el líquido penetrante que no ha penetrado en las discontinuidades, tal como se aprecia en la figura 49.

Figura 49*Limpieza del exceso de penetrante*

Fuente: Elaboración propia

4. Aplicación del revelador

Se aplica una fina capa de revelador, que es un talco en suspensión a la superficie de la muestra para provocar que el penetrante “atrapado” emerja desde el interior de las fallas hasta hacerse visible. En la figura 50 se observa dicha operación.

Figura 50*Aplicación del revelador*

Fuente: Elaboración propia

5. *Indicaciones del revelador*

El revelador debe permanecer sobre la superficie de la muestra para permitir la extracción del penetrante hacia fuera de cualquier tipo de falla superficial. El tiempo requerido de permanencia fue de 15 minutos.

6. *Limpieza total de la probeta*

El paso final de este proceso es una limpieza minuciosa, como se muestra en la figura 51, para remover la totalidad del revelador aplicado sobre la superficie de los componentes que fueron encontrados aceptables.

Figura 51

Limpieza de la probeta



Fuente: Elaboración propia

7. *Inspección e interpretación*

Una vez realizados los pasos anteriores se realizó las interpretaciones.

c) Ensayo de doblado guiado de cara y raíz

Durante el ensayo de doblado se aplica una carga en el punto central del material que contiene la soldadura mientras que el resto de la muestra se apoya en los extremos de la fijación, como se muestra en la figura 52, procediéndose a doblar a 180°. Las pruebas fueron de cara y raíz. En la figura 53 se observa las probetas para la prueba de dobléz.

Figura 52

Aplicación de carga en la parte central de la probeta



Fuente: Elaboración propia

Figura 53

Probeta para la prueba de dobléz



Fuente: Elaboración propia

En el Registro de calificación del procedimiento (PQR), se detallan los resultados de la prueba de dobléz.

Tabla 18*Resultados de la prueba de doblado*

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica



Ensayo de doblado guiado						PQR
Datos informativos del espécimen a ensayar						
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	120	Voltaje	22.5	Veloc. de soldeo 3.5
Tipo de estudio:	De laboratorio		Nº de probeta:		4	
Norma aplicable:	ASTM E190-14		Fecha de elaboración:		13/01/2022	
Realizado por:	Ronald Reyes Cereceda – Erika D. Taco Taipe		Asesor:		Ing. Mg. Elías t. Peña Peña	
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. UNSAAC					
Espesor de la probeta:	6.175 mm	Longitud de la probeta:		150 mm		
Resultados						
Probetas			Observaciones			
Cara						
			No presenta ninguna discontinuidad (fisuras o grietas).			
Raíz						
			No Presenta Discontinuidades (Grietas O Fisuras)			
Aprobación: Ing. Mg. Elías Peña P.			Aprueba			

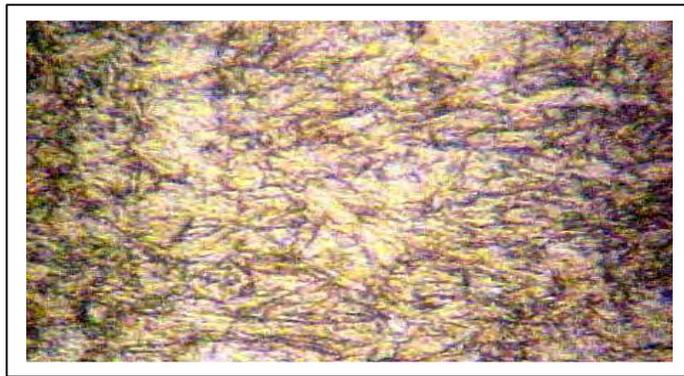
Fuente: Elaboración propia

d) Análisis metalográfico

La figura 54, muestra la microestructura del metal base Hardox 450, donde se puede observar una microestructura martensítica debido al bajo contenido de carbono (0.18% de C), lo que le da esa propiedad de acero anti desgaste. Esta microestructura puede variar de acuerdo a su proceso de fabricación.

Figura 54

Microestructura del metal base Hardox 450 (Aumento 100 X)

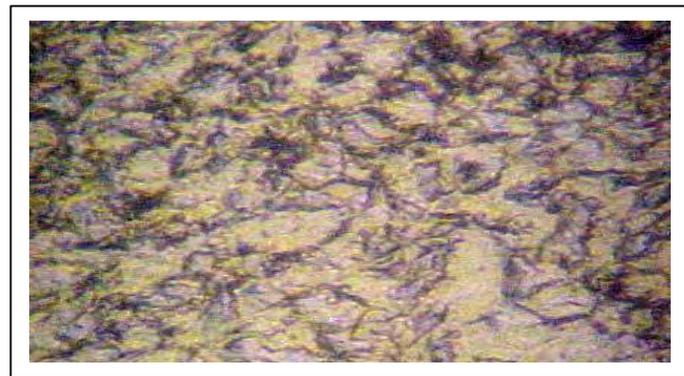


Fuente: Elaboración propia

En zona afectada por el calor (ZAC) se observan una estructura martensítica combinado con bainita, producto del calor aportado, lo que influye en la dureza (menor dureza), en la figura 55 se observa este tipo de microestructura.

Figura 55

Microestructura de la ZAC (Aumento 100 X)

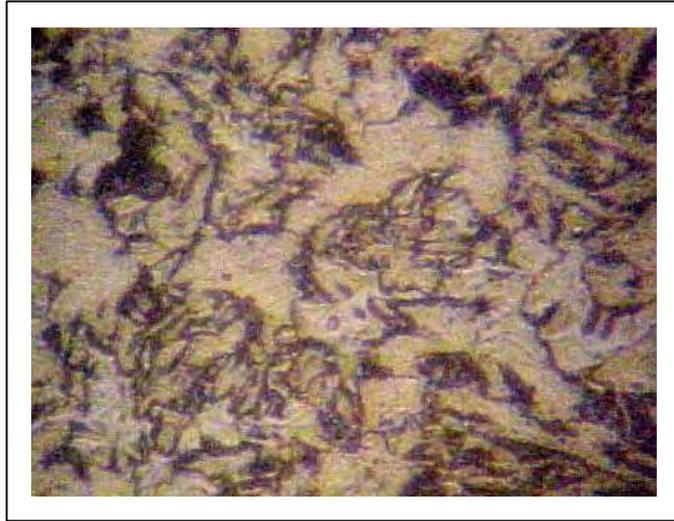


Fuente: Elaboración propia

Mientras que la zona de fusión o zona del cordón de soldadura muestra una microestructura de ferrita y perlita laminar, cuya dureza tiene una dureza inferior a la martensita. En la figura 56 se observa este tipo de microestructura.

Figura 56

Microestructura de la zona de fusión



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

DISCUSION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS

a) Calor aportado

En la tabla 18 se resume los resultados del cálculo de calor neto aportado.

Tabla 19

Resultados del calor neto aportado

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Veloc. de desplazamiento (mm/s)	Calor neto aportado (J/mm)
1	85	21.5	2.6	527.16
2	100	22.0	3.0	550.00
3	115	22.0	3.4	558.08
4	120	22.5	3.5	565.71
5	140	22.5	3.6	656.25

Fuente: Elaboración propia

b) Ancho de la zona afectada (Y)

Tabla 20

Resultados del cálculo del ancho de la ZAC

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Veloc. de desplazamiento (mm/s)	Calor neto aportado (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
1	85	21.5	2.6	527.16	3.54
2	100	22.0	3.0	550.00	3.70
3	115	22.0	3.4	558.08	3.75
4	120	22.5	3.5	565.71	3.80
5	140	22.5	3.6	656.25	4.41

Fuente: Elaboración propia

c) Ensayo de dureza

Tabla 21

Resultados de la prueba de dureza

Numero de probeta	Diámetro del indentador (mm)	Temperatura (°C)	Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Diámetro de la indentación (mm)	Grado de carga	Dureza HB
4	5	(a) 1535.00	601.52	1.3	1.35	555
	5	(b) 981.40	154.59	1.4	1.57	477
	5	(c) 723.39	60.89	1.45	1.68	466

Fuente: Elaboración propia

d) Inspección visual

En la tabla 22 se resume los resultados de la inspección visual.

Tabla 22

Resultados de la inspección visual

Probeta	Defecto	Causa	Calidad del deposito
1	Baja penetración	Alta velocidad de soldadura, pero baja corriente	Mala
2	Penetración incompleta	Alta velocidad de soldadura, pero baja corriente	Regular
3	Deposito aceptable	Velocidad de soldeo aceptable Intensidad de corriente aceptable	Buena
4	Muy buen deposito	Amperaje, velocidad de soldeo y ángulo de soldeo ideales	Muy Buena
5	Exceso de penetración	Exceso de recargue de material	Mala

Fuente: Elaboración propia

e) Inspección por tintes penetrantes

Los resultados de la prueba de tintes penetrantes se resumen en la tabla 23.

Tabla 23
Resultados de la inspección visual por tintes penetrantes (fluorescentes)

Probeta	Observaciones	Defectos
1	Presenta discontinuidad	Falta de fusión
2	Presenta discontinuidad	Mordedura
3	Presenta discontinuidad	Mordedura
4	No presenta discontinuidad	Ninguna
5	Presenta discontinuidad	Velocidad excesiva

Fuente: Elaboración propia

f) Resultados del ensayo de doblez

En la tabla 24 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de doblez.

Tabla 24
Resultados del ensayo de doblez

Probeta	Doblado		Discontinuidad o defecto.	Calificación	
	Cara	Raíz		Cumple	No cumple
4	X		No presenta	X	
4		X	No presenta	X	

Fuente: Elaboración propia.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presenta el análisis de los resultados del calor de aporte neto, ancho de la zona afectada por el calor, ensayo de dureza, inspección visual, líquidos penetrantes y el ensayo de doblado, que a continuación se describen.

a) Calor aportado

Respecto al calor aportado, como se aprecia en la tabla 19, cuando la intensidad de corriente es baja el aporte de calor es baja y a medida que se aumenta la intensidad de corriente el aporte de calor también aumenta, ambas están muy relacionadas y, por lo tanto, podemos

indicar que cuanto más alto sea la intensidad de corriente mayor será la cantidad de calor aportado y así mismo con menor aporte térmico se obtiene una mayor velocidad de enfriamiento.

En relación al aporte de calor con la velocidad de avance, cuando la velocidad de avance es lenta el aporte de calor será mayor, generando un ancho de ZAC mayor; así mismo, con el avance de soldeo lento se aumenta la deposición del metal de aporte y consecuencia de ello genera un cordón de soldadura más ancho; por el contrario, cuando la velocidad de avance es rápida el aporte de calor es bajo. En la medida con que se aumenta la velocidad de soldeo, la cantidad de energía aportada será mucho menor y existirá una tendencia a producir socavado a lo largo de los bordes del cordón de soldadura. En conclusión, cuanto mayor es la velocidad de avance menor es la anchura del cordón, menor es el aporte de calor y más rápido se enfriará la soldadura y se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (poros).

Otro parámetro no menos importante que se observe es la longitud de arco, lo mismo esta influye en el calor de entrada sobre la junta soldada. En general la longitud de arco debe ser igual al diámetro del electrodo, un arco demasiado corto puede ser errático y producir cortocircuitos durante la transferencia del metal, un arco demasiado largo perderá la direccionalidad e intensidad.

El aporte de calor depende en gran medida de la intensidad de corriente, la tensión eléctrica y la velocidad de soldeo; en la cual estos parámetros son dependientes del diámetro del electrodo. En el soldeo de las probetas, se utilizó el electrodo 7018 de diámetro de 1/8 de pulgada y se estableció una longitud de arco normal de 2 a 2.5 mm en promedio por ser un

electrodo de tipo básico con una intensidad de corriente entre 85 a 150 A en la cual fue determinante sobre el aporte de calor y a su vez sobre el ancho de la zona afectada por el calor.

El aporte de calor influye sobre la microestructura lo que, a su vez, con el aumento de la temperatura podría ocurrir crecimiento de grano. El aporte de calor generado por los diferentes parámetros en las juntas soldadas del acero Hardox no produce crecimiento de grano por la composición química que presenta el metal base, éste por ser de 0.18% de C, denominado acero dulce posee ya de por sí buena soldabilidad y el riesgo de fisuración en frío es muy bajo. Pero, si este acero por su presente composición química respecto al % de C la velocidad de enfriamiento fuera lenta como consecuencia de aporte de calor elevado, se promovería el crecimiento de grano y engrosamiento de la misma produciendo una microestructura con poca resistencia mecánica y tenacidad. Lo que se traduce, que el acero Hardox por ser un acero dulce con buena soldabilidad no requiere de precalentamientos para espesores de 1/4 de pulgada.

El efecto del calor de aporte sobre la granulación hereditaria es determinante. Cabe mencionar que el tamaño de grano tiene un efecto notable en las propiedades mecánicas del metal y el acero Hardox por las propiedades estructurales que posee y por ser un acero dulce su tamaño de grano es fino, su tendencia al crecimiento grano es bajo a menos que el aporte de calor sea muy alto se promovería el crecimiento de grano como consecuencia de un enfriamiento lento. En tanto, el aporte de calor en la junta soldada del acero HARDOX no fue muy elevado y la velocidad de enfriamiento moderadamente rápido de manera uniforme a lo largo de la superficie de la junta soldada en la cual prevalece el grano fino hereditario sin tendencia al crecimiento.

Así mismo se concluye cuando los granos son de menor tamaño, se aumenta la resistencia del material, debido a que no permiten el deslizamiento de las dislocaciones, pero

se reduce su ductilidad, tienen menor tendencia a agrietarse, posee mayor tenacidad; por otro lado, un tamaño de grano grande tiene menor resistencia, menor dureza, pero con mayor ductilidad.

Es de resaltar que, el aporte de calor es el parámetro más importante que condiciona las propiedades mecánicas de la unión soldada dependientes de la microestructura del material.

b) Ancho de la zona afectada (Y)

Según la tabla 20 podemos indicar, a medida que se incrementa la intensidad de corriente se incrementa el aporte de calor. Esto significa que conforme aumenta el calor de aporte, se ensancha la zona afectada por el calor.

Con respecto a la velocidad de desplazamiento, si es lenta producirá mayor aporte de calor y por lo tanto aumenta la zona afectada por el calor por lo que también la velocidad de enfriamiento se vería afectada. Cuando el calor de aporte aumenta, la velocidad de enfriamiento disminuye.

Cuanto más baja sea la conductividad térmica del material, la ZAC será menor. Y cuanto más alta sea la conductividad térmica del metal, más rápido se enfriará después de la soldadura.

La conductividad térmica del metal juega, pues, un papel muy importante en el ancho de la ZAC y en la velocidad de enfriamiento de cualquier punto ubicado en la ZAC, lo cual incide directamente sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de dicha región de la unión soldada.

Al realizar el soldeo de las probetas del acero Hardox 450 aplicando el proceso SMAW con diferentes variables de soldeo se ha verificado diferentes anchos de ZAC y las probetas no

requerían de precalentamiento por el espesor de las mismas, a pesar que el valor del carbono equivalente es ligeramente mayor a 0.3.

c) Ensayo de dureza

De la tabla 21, se puede indicar que la dureza a aumentado tanto en la zona del depósito, zona intermedia de la ZAC, esto se debe a la velocidad de enfriamiento que ha tenido en cada uno de esos puntos.

Después de realizar el soldeo de las 5 probetas, la probeta Nro. 4 es la más representativa, en la cual, inicialmente el metal base posee una dureza de 461 HB. En cuanto a la junta soldada a 3.8 mm de ZAC su dureza es de 466 HB mientras que en la zona intermedia de la ZAC es decir a 1.8 mm su dureza asciende a 477 HB y en la Zona de fusión su dureza incrementa a 555 HB. Lo que se traduce en un ligero endurecimiento en la zona intermedia de la ZAC y en la zona de fusión como consecuencia del aporte de calor y la velocidad de enfriamiento con los siguientes parámetros de soldeo: intensidad de corriente de 120 A, tensión eléctrica de 22.5 V, velocidad de avance de 3.5 mm/s y utilizando electrodo 7018.

d) Inspección visual

Según la tabla 21, la probeta 1 a causa de la velocidad de soldeo alta y por la intensidad de corriente baja (85 A) la calidad del depósito es mala presentando como defecto la baja penetración material de aporte. Por otro lado, la probeta 5 a causa de una intensidad de corriente elevada (140 A) se presenta en la unión soldada un exceso de penetración calificándolo como depósito de soldadura mala por el excedente de material de aporte. En cambio, la probeta 4 por ser su intensidad de corriente adecuada (120 A) y una velocidad de soldeo apropiada, se obtuvo

una muy buena calidad de soldeo, así mismo el depósito de soldadura de buen aspecto y dimensiones correctas sin presencia de defectos.

e) Inspección por tintes penetrantes

Al realizar este ensayo, se determina si las probetas presentan discontinuidades. Con respecto a las 5 probetas que pudo inspeccionar que la probeta 4 no presenta discontinuidad por lo que se seleccionó dicha probeta para el ensayo de doblez, así mismo, se realiza el ensayo de doblez para finalizar las pruebas y determinar si esta cumple con la calificación de una buena junta soldada y se garantice la fiabilidad del conjunto soldado.

La probeta Nro. 4 sometida a inspección por líquidos penetrantes a no presenta ninguna discontinuidad y por lo tanto está exenta de defectos, lo cual la califica como apto para la prueba de doblez.

Las probetas número 1, 2, 3 y 5 presentaron defectos en su mayoría discontinuidad como la presencia de porosidad, falta de fusión, mordeduras causa de la intensidad de soldeo, velocidad de desplazamiento inadecuada; cabe mencionar que otro factor pudo ser el estado del electrodo.

f) Resultados del ensayo de doblez

Dado que la probeta 4 es la seleccionada por no presentar discontinuidad, se realizó la prueba de doblez de cara y raíz, el cual cumplió con los requisitos exigidos sin presentar ningún defecto. Tanto, la cara como la raíz de la soldadura no presento fisuras, porosidad ni grietas lo cual se traduce que la junta soldada fue realizada con los parámetros adecuados logrando la unión satisfactoria y de buena calidad. Por lo tanto, con esta prueba final se garantiza la junta soldada dando fiabilidad a su buen comportamiento en servicio.

CONCLUSIONES

Primera, El aporte de calor produce cambios micro estructurales en la ZAC y zona de fusión; así mismo, el calor aportado incrementa el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC). La probeta más representativa de las 5 probetas es la probeta Nro. 4. Comparando las microestructuras; con los resultados obtenidos en la junta soldada, en la zona de fusión es la estructura martensítica que coexiste con la bainita, la cual es de forma acicular (forma de agujas). En la zona afectada por el calor (ZAC) debido a su coexistencia de la estructura martensítica con perlita fina es de forma acicular y con incrustación de láminas finas de perlita. Por lo tanto, hubo un ligero cambio microestructural con respecto a la microestructura martensítica del metal base.

Segunda, La intensidad de corriente, la tensión eléctrica y la velocidad de avance influye en el aporte de calor. El aporte de calor es directamente proporcional a la corriente y tensión de arco e inversamente proporcional a la velocidad de avance. Así cordones de soldadura ejecutados con bajos niveles de amperaje producen también bajos aportes de calor; por otro lado, a medida que se incrementa la intensidad de corriente se incrementa el aporte de calor. Esto significa que conforme aumenta el calor de aporte, se ensancha la zona afectada por el calor. En la cual, el calor de aporte neto en la probeta Nro. 4 es 565 J/mm considerando los siguientes parámetros de soldeo: intensidad de corriente de 120 A, tensión eléctrica de 22.5 V y velocidad de avance de 3.5 mm/s; por lo tanto, trabajando con estos parámetros de soldeo con respecto a la dureza cabe mencionar que no hubo un elevado endurecimiento en la zona afectada por el calor (49 HRC) con respecto al metal base (48 HRC) producto de los cambios microestructurales de la soldadura.

Tercera, El aporte de calor generado por los diferentes parámetros en las juntas soldadas del acero Hardox no produce grandes cambios en el crecimiento de grano por la composición química que presenta el metal base, éste por ser de 0.18% de C, denominado acero dulce posee ya

de por si buena soldabilidad, tamaño de grano fino y el riesgo de fisuración en frio es muy bajo. En la cual, el conocimiento de la composición química del metal base fue determinante, y a partir de ella también se pudo determinar el carbono equivalente obteniendo un CE de 0.32 lo que indica según el diagrama de Graville que el acero HARDOX posee buena soldabilidad y no requiere precalentar el metal a soldar. Por ende, si no requiere precalentamiento el aporte de calor se disipará rápido por la velocidad de enfriamiento. Por el contrario, si el metal base requeriría precalentamiento el aporte de calor aumentaría y la velocidad de enfriamiento seria lenta.

Cuarta, El efecto del calor de aporte sobre la granulación hereditaria es determinante. El aporte de calor en la junta soldada del acero HARDOX no fue muy elevado y la velocidad de enfriamiento moderadamente rápido de manera uniforme a lo largo de la superficie de la junta soldada en la cual prevalece el grano fino hereditario sin tendencia al crecimiento. Cabe mencionar que el tamaño de grano tiene un efecto notable en las propiedades mecánicas del metal y el acero Hardox por las propiedades estructurales que posee y por ser un acero dulce, su tamaño de grano es fino, su tendencia al crecimiento grano es bajo a menos que el aporte de calor sea muy alto se promovería el crecimiento de grano como consecuencia de un enfriamiento lento. Así mismo se concluye cuando los granos son de menor tamaño, se aumenta la resistencia del material, debido a que no permiten el deslizamiento de las dislocaciones, pero se reduce su ductilidad, tienen menor tendencia a agrietarse y posee mayor tenacidad.

RECOMENDACIONES

1. Al soldar este tipo de acero microaleado Hardox 450 se deberá seguir el procedimiento aprobado no se debe precalentar para este espesor (6.35 mm) y los parámetros de soldadura especificados no deben tener modificación alguna para evitar otras transformaciones en la zona de fusión y la zona afectada por el calor (ZAC).
2. Es necesario caracterizar las probetas mediante metalografía antes de definir el proceso de uniones entre los materiales.
3. Se deberá desarrollar mayores estudios para mayores espesores considerando nuevos parámetros de soldeo; teniendo en cuenta su composición química, el aporte de calor, entre otros.
4. Realizar un nuevo estudio utilizando los parámetros encontrados aplicando los demás procesos de soldadura por arco eléctrico y evaluar el cambio que producirá el aporte de calor en la microestructura en justas soldadas a tope o en filete.

BIBLIOGRAFÍA

- (2012). En A. W. Society, *Manual de Soldadura* (pág. 20). Mexico.
- Abriego Iparraguirre, Y. (1996). *Metalografía y Propiedades de los Metales Industriales*. Lima: Concytec. Obtenido de <http://sisbib.ucss.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-MARCdetail.pl?biblionumber=1251>
- Anónimo. (15 de Febrero de 2015). *Electiva Metalurgia*. Obtenido de electivapmetalurgicos.blogspot.com: <http://electivapmetalurgicos.blogspot.com/>
- Arriaga, M. A. (6 de Agosto de 2013). *Curso de molienda primera parte*. Obtenido de es.slideshare.net: https://es.slideshare.net/caaz05/molienda-96743051?next_slideshow=96743051#
- ASTM E18-03. (16 de Agosto de 2017). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*. Obtenido de www.astm.org: <https://www.astm.org/e0018-03.html>
- BF Mexico. (14 de 02 de 2022). *Cedulacion de parmetros para soldadura*. Obtenido de bfmx.com: <https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/>
- Bravo Calvo, E. F. (27 de Enero de 2022). *Imperfecciones En Soldadura Y Tipos De Discontinuidades Introducción*. Obtenido de www.academia.edu: https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones_En_Soldadura_Y_Tipos_De_Discotinuidades_Introducci%C3%93n
- CC.OO de Andalucía. (2011). Ensayos Destructivos Metalúrgicos. *Revista digital para profesionales de la enseñanza*, 14. Obtenido de <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8427.pdf>
- Chavira, J. A. (2016). Reducción Del Defecto De Falta De Fusión En Soldadura Para El Proceso Gmaw En Acero Hardox 450 En La Fabricación De Cajas Para Camión. *Reducción Del Defecto De Falta De Fusión En Soldadura Para El Proceso Gmaw En Acero Hardox 450 En La Fabricación De Cajas Para Camión*. Corporación Mexicana De Investigación En Materiales, Saltillo, COAHUILA, Mexico.
- Destructivos, a. d. (2009). Ensayos no destructivos- Líquidos penetrantes. *Ensayos no destructivos- Líquidos penetrantes*. Asociación española de ensayos no destructivos, Madrid.
- Díaz Quiñones, A. H., & Vargas Goñas, R. W. (2014). Efecto De La Temperatura De Pre calentamiento Sobre La Susceptibilidad A Fisuración En Frio, Dureza Y Tenacidad De La Entalla En La Soldadura Del Acero Hardox 450, Utilizando Proceso Gmaw”. *Efecto De La Temperatura De Pre calentamiento Sobre La Susceptibilidad A Fisuración En Frio, Dureza Y Tenacidad De La Entalla En La Soldadura Del Acero Hardox 450, Utilizando Proceso Gmaw*”. Universidad Nacional de trujillo, Trujillo.

- Echevarria, R. (2002). *Defectologia*. Universidad Nacional de Comahue, Santiago de Chile, Chile.
- fdocuments. (2020). *Introducción A La Metalurgia De La Soldadura*. Obtenido de fdocuments.ec: <https://fdocuments.ec/document/introduccion-a-la-metalurgia-de-la-soldadura-56645fa627950.html?page=17>
- Fosca, C. (2003). *Introduccion A La Metalurgia De La Soldadura. Introduccion A La Metalurgia De La Soldadura*. PUCP, Lima.
- Fosca, C. (2007). *Introduccion a la metalurgia de la soldadura. Introduccion a la metalurgia de la soldadura*. PUCP, Lima, Peru. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>
- Granjon, H. (1989). *Bases metalúrgicas de la soldadura*. (C. M. Álvarez, Trad.) Francia: Edit. Eyrolles.
- Graville, B. A. (1990). *"Hydrogen Cracking Sensitivity of HSLA Steels," The Metallurgy, Welding, and Qualification of Microalloyed (HSLA) Steel Weldments*. Houston.
- Hernandez Riesco, G. (1991). *Manual del soldador*. México: Edit. Cesol. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/382381838/Manual-del-Soldador-German-Hernandez-Riesco-pdf>
- Horwitz, H. (1990). *Soldadura: Aplicaciones y prácticas*. México: Alfaomega. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/389085266/Soldadura-Aplicaciones-y-Practica-Horwitz>
- Howard B., C. (1992). *Manual de soldadura moderna*. México: Edit. Prentice Hall. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/263982663/Manual-de-Soldadura-moderna-Howard-b-Cary-Tomo-2-Parte-1>
- Jeffus, L. (2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones*. España: Ediciones Paraninfo, S.A. Obtenido de https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura_Principios_y_aplicaciones.html?id=rHynAxzh0iEC&redir_esc=y
- Labrador, B. (21 de Septiembre de 2018). *Proceso de Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAN)*. Obtenido de www.stargas.com.ve: <https://www.stargas.com.ve/blog/proceso-de-soldadura-por-arco-electrico-con-electrodo-revestido-smaw/>
- Medina de Miranda, E., & Miranda Zanardi, L. (2015). *Investigando en Ingenieria*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa., Arequipa.
- Rosales Marín, G., Andrade Martínez, J., Alvarado Macías, G., Espinosa Serrano, E., & Nava Gómez, D. (2020). *Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador*.

Ingeniería Investigación y Tecnología, 21(2), 1-8.
doi:<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.020>

- Segovia, R. (1997). *Reemplazo optimo de componentes sujetos a desgaste bajo la realización de inspoecciones periódicas*. Pontifica Universidad Catolica de Chile, Chile.
- SENATI. (2018). *Ajuste, Montaje, Verificación Y Control De Máquina/Mecanismo*. Obtenido de <http://gomez2010.weebly.com/>:
http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/89001495_ajuste_montaje_verificacion_y_control_de_maquinas_-_parte_i_5_5_2_2.pdf
- Society, A. W. (2009). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/manual-de-soldadura-vol-1-aws-pdf-free.html>
- Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.
- Soldexa. (2015). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos* (séptima edición ed.). México.
- Valka, T. Y. (2019). Investigación Y Análisis Sobre La Influencia Del Proceso De Soldadura En Las Propiedades Mecánicas De Los Aceros Antidesgaste Hardox. *Investigación Y Análisis Sobre La Influencia Del Proceso De Soldadura En Las Propiedades Mecánicas De Los Aceros Antidesgaste Hardox*. Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa, Arequipa.
- Vargas Goñas, R. W., & Díaz Quiñones, A. H. (s.f.). “Efecto De La Temperatura De Pre calentamiento Sobre La Susceptibilidad A Fisuración En Frio, Dureza Y Tenacidad De La Entalla En La Soldadura Del Aceroy Tenacidad De La Entalla En La Soldadura Del Acero Hardox 450, Utilizando Proceso Gmaw”. “*Efecto De La Temperatura De Pre calentamiento Sobre La Susceptibilidad A Fisuración En Frio, Dureza Y Tenacidad De La Entalla En La Soldadura Del Aceroy Tenacidad De La Entalla En La Soldadura Del Acero Hardox 450, Utilizando Proceso Gmaw*”. Universidad Nacional De Trujillo, Trujillo.

ANEXOS

Anexo I

Ficha técnica del acero Hardox 450

HARDOX®
WEAR PLATE

Data sheet 168es Hardox® 450 2018-02-12

Hardox® 450

Descripción general del producto

El acero resistente a la abrasión más popular, que presenta excelentes propiedades estructurales.

Hardox® 450 es un acero resistente a la abrasión con una dureza nominal de 450 HBW. Hardox® 450 combina una soldabilidad y capacidad de plegado óptima. Los productos se pueden usar en una gran diversidad de componentes y estructuras sometidas al desgaste. Hardox® 450, con 50 puntos extra de dureza Brinell en comparación con nuestra calidad 400, proporciona resistencia contra las indentaciones y la abrasión; presentando una vida útil más larga, y resultando aún más rentable.

Intervalo de dimensiones

Hardox® 450 está disponible en chapa gruesa en espesores de 3,2 a 130 mm, chapa en espesores de 2,0 a 8,0 mm y en chapa laminada en frío en espesores de 0,7 a 2,1 mm. Para espesores superiores a 80 mm, se recomienda un ancho de 1650 mm. Encontrará información más detallada sobre este aspecto en el programa de dimensiones.

Propiedades mecánicas

Calidad	Espesor (mm)	Dureza ¹⁾ (HBW)	Tensión de rotura R_m (MPa) garantizado	Límite de elasticidad típico (MPa), no garantizado
Hardox® 450 Chapa CR	0.7 - 2.10	425 - 475 ²⁾	1370 - 1600	1250
Hardox® 450 Chapa	2.0 - 8.0	425 - 475	-	1250
Hardox® 450 Chapa gruesa	3.2 - 80.0	425 - 475	-	1250
Hardox® 450 Chapa gruesa	80.1 - 103.0	410 - 475	-	1250
Hardox® 450 Chapa gruesa	103.1 - 130.0	390 - 475	-	1250

¹⁾Dureza Brinell, HBW, de conformidad con la norma EN ISO 6506-1, en una superficie fresada de entre 0,5 y 3 mm bajo la superficie. Al menos una muestra por cada colada y cada 40 toneladas.

²⁾La prueba de dureza no se realiza ni se garantiza para el material laminado en frío Hardox® 450. El intervalo de dureza es una conversión de la resistencia a la tracción.

El espesor nominal de las chapas suministradas no se desviará más de +/- 15 mm del espesor de la muestra del ensayo empleada para los ensayos de dureza.

La chapa Hardox® está templada. La dureza mínima del núcleo es del 90 % respecto a la dureza de superficie mínima garantizada.

Propiedades de impacto

Calidad	Ensayo longitudinal, energía de impacto típica, probeta de ensayo Charpy V 10x10 mm.	Ensayo transversal, energía de impacto garantizada, probeta de ensayo Charpy V 10x10 mm.
Chapa y chapa gruesa Hardox® 450	50 J/ -40 °C	-
Hardox® 450 Tuf ¹⁾	-	Min. 27 J/ -20 °C ²⁾

¹⁾ Ensayo de impacto realizado en espesores ≥ 6 mm. Para espesores de entre 6 - 11,9 mm, se usan probetas de Charpy V de tamaños inferiores. El valor mínimo especificado es en ese caso proporcional al área transversal de la muestra del ensayo en comparación con una muestra de tamaño estándar (10 x 10 mm). Ensayo de impacto de conformidad con ISO EN 148 por cada colada y grupo de espesor. Media de tres ensayos.

²⁾ Valor mínimo único 70% de media especificada.

Composición química (análisis de colada)

Calidad	C ^{*)} (max %)	Si ^{*)} (max %)	Mn ^{*)} (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr ^{*)} (max %)	Ni ^{*)} (max %)	Mo ^{*)} (max %)	B ^{*)} (max %)
Chapa CR	0.18	0.25	1.30	0.015	0.004	0.10	0.10	0.04	0.003
Chapa y chapa gruesa	0.26	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60	0.005

El acero es de grano refinado^{*)} Sustancias de aleación intencionadas.

Contenido en carbono equivalente CET (CEV)

Espesor	chapa CR 0.7 - 2.10	chapa 2.0 - 8.0	chapa gruesa 3.2 - 4.9	chapa gruesa 5.0 - 9.9	chapa gruesa 10.0 - 19.9	chapa gruesa 20.0 - 39.9	chapa gruesa 40.0 - 80.0	chapa gruesa 80.1 - 130.0
Máx	0.33 (0.44)	0.35 (0.48)	0.37 (0.48)	0.38 (0.49)	0.39 (0.52)	0.41 (0.60)	0.43 (0.74)	0.41 (0.67)
típ.	0.31 (0.39)	0.26 (0.39)	0.29 (0.39)	0.33 (0.45)	0.36 (0.48)	0.38 (0.56)	0.38 (0.61)	0.39 (0.64)

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

SSAB

Tolerancias

Encontrará información detallada en los folletos de SSAB 41-Información general de productos Strenx, Hardox®, ArmoX y Toolox - Reino Unido y Garantías de Hardox® o bien, en www.ssab.com.

Espesor

Tolerancias de conformidad con las garantías de espesor de Hardox®. Las garantías para chapa de Hardox® cumplen los requisitos de la norma EN 10 029, clase A. Las garantías para chapa de Hardox® cumplen los requisitos de 1/2 norma EN 10 051 y EN 10 131 para productos de chapa laminada en frío.

Longitud y ancho

Conforme con el programa de dimensiones de SSAB. Tolerancias para chapa de conformidad con los estándares para bordes sin tratar de SSAB o tolerancias conformes a la norma EN 10 029 y EN 10 131 para chapa laminada en frío. Tolerancias conformes a la norma EN 10 051 para chapa, tolerancias más estrictas disponibles a petición.

Forma

Tolerancias de conformidad con la norma EN 10 029 para chapa gruesa y con la norma EN 10 131 para chapa laminada en frío.

Planicidad

Tolerancias para chapa gruesa de conformidad con las garantías de planicidad de Hardox® clase D, que son más estrictas que las especificadas en la norma EN 10 029. Tolerancias para chapa de conformidad con las garantías de planicidad de Hardox® clase A, que son más estrictas que las especificadas en la norma EN 10 051. Tolerancias para chapa laminada en frío de conformidad con las garantías de planicidad de Hardox® clase B.

Propiedades de la superficie

De conformidad con la norma EN 10 163-2, clase A subclase 1.

Plegado

Capacidad de plegado de la chapa de conformidad con la garantía de plegado de Hardox® clase E. Capacidad de plegado de chapa fina de conformidad con la garantía de plegado de Hardox® clase C. Capacidad de plegado de chapa de conformidad con la garantía de plegado de Hardox® clase B.

Condiciones de entrega

Se suministran en estado templado o templado y revenido. Las chapas gruesas Hardox® 450 se suministran con bordes cizallados o cortados térmicamente y los espesores superiores a 80 mm se suministran con borde sin tratar como opción estándar. Las chapas Hardox® 450 se suministran en estado laminado y con los bordes sin tratar como opción estándar. Las chapas laminadas en frío Hardox® 450 en espesores de 0,70 a 2,10 mm se suministran con la superficie laminada en frío. Puede encontrar los requisitos de entrega en el folleto de SSAB 41-Información general de los productos Strenx, Hardox, ArmoX y Toolox - Reino Unido o bien, en www.ssab.com.

Producción y otras recomendaciones

Soldadura, doblado y mecanizado.

Encontrará recomendaciones en los folletos de SSAB en www.hardox.com, o puede consultar nuestro soporte técnico, techsupport@ssab.com.

Hardox® 450 y Hardox® 450 Tuf no se han concebido para aplicarles un tratamiento térmico posterior. Las propiedades mecánicas se deben al proceso de templado y, cuando resulta necesario, un revenido posterior. Las propiedades del producto, en el momento de realizar la entrega, no se conservan si éste se somete a temperaturas superiores a 250 °C.

Se deberán tomar las precauciones de seguridad adecuadas para soldar, cortar, rectificar o hacer otros trabajos con este producto. El granallado, especialmente de las chapas recubiertas de imprimación, puede generar polvo con una elevada concentración de partículas.

Información y contacto

www.ssab.com/contact

Anexo 2

Ficha técnica del electrodo E7018

SMAW

Aceros al Carbono y Baja Aleación



SUPERCITO

Electrodo revestido de tipo básico, de bajo hidrógeno con extraordinarias características mecánicas y de soldabilidad. Presenta un arco muy suave, bajo nivel de salpicaduras y la escoria es de muy fácil remoción. El contenido de hierro en polvo mejora su tasa de depósito. Dentro de su categoría es el producto que presenta los mejores niveles de resistencia a la tracción.

Clasificación	
AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1	E7018

Aprobaciones	Grados
ABS	3H15, 3Y
LR	3m, 3ym
GL	3Y

Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	1,00	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	520 – 610 (75 400 – 88 450)	mín. 400 (58 000)	mín.23	[-30 °C (-22 °F)] mín. 70 (57)

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. Almacenamiento en horno: 125 - 150°C. Resecado de 300°C a 350 °C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		-	60	90	120	170	210
Amperaje máximo		-	90	140	190	240	280

Aplicaciones

- Para aceros de mediano a alto contenido de carbono, alta resistencia y baja aleación.
- Para aceros de alto contenido de azufre y fácil fresado.
- Para aceros laminados al frío.
- Por sus características de resistencia y su fácil manejo, especialmente adecuado para: Soldaduras de tuberías de vapor, calderas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, instalaciones de la industria petrolera, petroquímica y minera.

Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

Anexo 3 Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
EFECTO DEL CALOR DE ENTRADA EN LA MICROESTRUCTURA Y DUREZA EN JUNTAS SOLDADAS POR EL PROCESO SMAW DEL ACERO MICROALEADO HARDOX 450 (Investigación tecnológica)				
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general ¿Qué cambio producirá el calor de entrada en la microestructura en juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW?</p> <p>Problemas específicos a) ¿Cómo influye la intensidad de corriente en relación al calor de entrada sobre la microestructura en la zona afectada por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW? b) ¿Cómo influye la velocidad de avance en relación al calor de entrada sobre la microestructura en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW? c) ¿Cómo influye la composición química del metal base en relación al aporte de calor en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW? d) ¿Qué cambio producirá el aporte de calor sobre la granulación hereditaria en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW?</p>	<p>Objetivo general Evaluar el cambio que producirá el calor de entrada sobre la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450, bajo diferentes condiciones de entrada de calor, utilizando el proceso de soldadura SMAW.</p> <p>Objetivos específicos a) Evaluar el calor de entrada en relación a la intensidad de corriente utilizado en la soldadura de juntas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW. b) Evaluar el calor de entrada en relación a la velocidad de avance en las juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW. c) Evaluar el calor de entrada en relación a la composición química del metal base de las juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW. d) Evaluar el efecto del aporte de calor sobre la granulación hereditaria en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW.</p>	<p>Hipótesis general El calor de entrada aplicado por el proceso SMAW para la soldadura del acero de alta resistencia HARDOX 450 produce en la zona afectada por el calor (ZAC) cambios microestructurales.</p> <p>Hipótesis específicas a) La intensidad de corriente influye de manera significativa en el aporte de calor aplicado en la soldadura del acero Hardox 450 por el proceso SMAW. b) La velocidad de avance influye en el calor de entrada sobre las juntas soldadas del acero Hardox 450 por el proceso SMAW. c) La composición química del metal base influye en el aporte de calor de las juntas soldadas del acero microaleado HARDOX 450 por el proceso SMAW. d) El aporte de calor influye sobre la granulación hereditaria en la soldabilidad del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450 por el proceso SMAW.</p>	<p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Intensidad de corriente (A) ✓ Tensión eléctrica (V) ✓ Velocidad de avance (mm/s) ✓ Longitud de arco (mm) <p>Variables dependientes</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Aporte de calor neto (J/mm) ✓ Tipo de microestructura (morfología y tamaño de grano) <p>Variables intervinientes o externas</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperatura ambiental (°C) ✓ Composición química del metal base (%) ✓ Composición química del metal de aporte (%) ✓ Diámetro del material de aporte (mm) ✓ Destreza del soldador 	<p>NIVEL TIPO DE INVESTIGACION</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Descriptivo: Esta investigación se realiza describiendo el problema en una circunstancia espacial determinada, además esta investigación será la más adecuada para la problemática de la investigación, por su origen y su desarrollo. ✓ Experimental: Con esta investigación se pretende conocer las causa y efectos de las variables, donde se manipula las variables independientes y posteriormente se mide las variables dependientes. ✓ Analítico: En la presente investigación se va de lo general a lo específico, basándose en lo experimental.

Fuente: Elaboración propia